

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

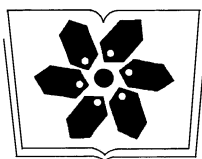
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期

2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)

农田水氮关系及其协同管理

王小彬^{1,2}, 代 快¹, 赵全胜¹, 武雪萍^{1,2}, 张丁辰¹, 冯宗会¹, 贾树龙³,
杨云马³, 蔡典雄^{1,2,*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与养分循环重点开放实验室, 北京 100081;
2. 农业部旱作节水重点开放实验室, 北京 100081; 3. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北石家庄 050011)

摘要:作物施氮反应及其氮肥利用率不仅取决于氮肥管理, 还与水资源管理有关, 并且受到地区气候因素的影响。针对中国灌溉农区氮肥环境污染问题日益突出, 协调农田水氮管理, 如通过改善水资源管理, 发挥水氮协同效应, 以提高水分利用效率来改善氮肥利用率, 实现水氮利用率双赢, 是当前农业水氮管理中亟待探讨和回答的问题。通过对农田水氮协同相关研究文献资料的综述, 以华北平原集约种植体系水氮管理为例, 根据历年统计数据, 分析了该区年水热条件下粮食产量与水、氮及水氮利用效率之间的关系。研究表明, 水和氮与作物产量在一定范围表现为水氮的协同效应。水分利用效率一般随灌溉水量减少及氮肥用量增加而提高; 氮肥利用效率随氮用量增加而下降。适量节水和减氮分别有助水分利用效率和氮肥利用效率的改善。在气候变暖、变干条件下, 适量施氮成为改善水氮利用效率的关键对策。

关键词:氮肥利用率; 水氮协同; 水氮管理; 水分利用效率

Opinions on water-nitrogen relations and their synergic management

WANG Xiaobin^{1,2}, DAI Kuai¹, ZHAO Quansheng¹, WU Xueping^{1,2}, ZHANG Dingchen¹, FENG Zonghui¹, JIA Shulong³, YANG Yunma³, CAI Dianxiong^{1,2,*}

1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling

2 Ministry of Agriculture Key Laboratory of Dryland Farming, Beijing 100081, China

3 Agro-Resources and Environment Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry, Shijiazhuang 050011, China

Abstract: Crop response to nitrogen (N) fertilization and N use efficiency (NUE) depend not only on N management, but also on water resource management and local climate. To the increasing environmental pollution induced by over-use of N in the irrigated areas, regulation of water-N management for achieving a win-win situation that will improve water use efficiency (WUE) and NUE has been still very concerned. Through literature reviews concerning water-N relations and their synergic management, as well as statistic data analysis with emphasis on an intensive wheat-maize cropping system in the North China Plain, the relationships between grain yields, water and N, as well as their use efficiencies under the regional climate conditions have been discussed.

In the last 20 years, the research on water-N management in China has been involved in rainfed farming areas, and further in water-saving irrigated farming areas. The recent research focused mainly and continuously on the improvement of crop yields and WUE in dryland farming, and also on N-related environmental problems associated with N over-use in the irrigated areas. Currently, in the intensive double-crop (wheat and maize) rotation systems in the North China Plain, a large amount of N surplus in soils and low response of crop yields to N fertilization in the most crop fields have been continuously exposed with annually over-N fertilizer inputs (as reported above 500–600 kg·hm⁻²·a⁻¹). The low response

基金项目:国家重点基础研究发展“973”计划项目(2007CB109305); 国家“863”计划项目(2006AA100220/2006AA100206); 科技部国际合作项目(2006DFB32180)资助

收稿日期: 2009-09-10; 修订日期: 2010-09-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dxcai@caas.ac.cn

of crop yields to irrigation water in some crop fields has been also observed due to over-irrigation. This implies that there is still a big scope for improvement of WUE and NUE by using water-saving and N-reducing practices in the irrigated areas. For instance, with recommended fertilization practices the NUE by wheat and maize could be up to 50% and 34%, respectively, as compared those with conventional practices (14% and 20%, respectively).

According to China statistics (1988—2007) in the regions of North China Plain, the changes in grain yields per ha showed significantly positive correlations with the mean air temperature annually, but little with the variations in rainfall. With the trend of declining annual rainfall and increasing annual air temperature, the Precipitation use efficiency (PUE) increased but NUE decreased significantly.

Based on many previous studies on water-N relation, the synergic relations between water, nitrogen, and crop yields were found in a given range. The WUE generally increased with decreasing irrigation water or increasing N fertilizer amount, while NUE declined with increasing the amount of N fertilizer. The WUE and NUE can be improved by using water-saving and N-reducing practices, respectively. Limited irrigation combined with the proper amount of N fertilizer will be a viable alternative to the condition of climate warming, and drying. As reviewed on water-N research progress abroad, some disparities between China and advanced countries exist, thus, further researches especially in the aspects of field or regional simulations, predictions, real-time monitoring and plant diagnosis related to crop water-N synergic management are still needed.

Key Words: nitrogen use efficiency; water-nitrogen management; water-nitrogen synergy; water use efficiency

近 20a 来,随着中国人口快速增长和粮食需求增加,肥料消费量日益增长,化肥在中国粮食增产中或者说对于解决中国人民的温饱问题无疑起到了不可替代的作用。如林葆总结全国化肥网长期试验数据指出,施用化肥可提高作物单产 50%,中国作物总产中有 1/3 为施用化肥的贡献^[1]。然而,据 Ye 和 Rozelle 统计资料说明,自 20 世纪 80 年代以来,肥料用量的增长速度始终超出粮食产量增长速度,而且其间的差距越拉越大^[2]。据 2005 年 FAO 资料统计^[3],中国化肥总产量和化肥总用量分别占世界的 22% 和 25%,居世界首位。中国的化肥消费总量还在继续上升,据 IFIA 资料统计,目前已占全球化肥消费量的 35%^[4]。Lin 等分析指出,化肥投入成本在作物生产总投入中为最高,每年化肥的费用约占总投入材料成本的 50% (种子、肥料、农药、农机具、灌溉等)^[5]。中国一些地区因氮肥过量或不合理施用导致土壤氮流失、水质下降、大气污染、生态系统氮循环失调,对生物多样性、全球气候变暖、人畜健康带来威胁,并造成能源和资源巨大浪费。用肥料利用效率 (本文采用国际农学界和国内学者常用的 PFP (Partial Factor Productivity) 即肥料偏生产力,指单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量^[6-8]) 可作为表征和评价肥料效应指标。张福锁等分析指出,中国的肥料效率 (PFP) 远低于法国,也低于美国^[6],目前中国每施入 1 kg 化肥只能平均生产 17.2 kg 的粮食,而美国和法国可达 22.4 和 69.2 kg^[9]。

作物施氮反应及其氮肥利用率不仅取决于施氮管理 (如施氮量、施氮时间、施氮方法等),还与水资源管理 (如灌水量、灌水时间、灌水方法等) 有关,并且很大程度上受到地区年气候 (如水热环境等要素) 变化的影响^[10-13]。水分即可能有助于土壤养分活化,提高氮素有效性,又可能增加氮素流失或淋溶损失,带来环境危害。协调水氮管理,如通过改善水资源管理,发挥水氮协同效应,以提高水分利用效率促进氮肥利用率的改善,同时解决中国氮肥利用率低下以及水分利用效率不高的问题,不仅在旱农地区而且在集约化灌溉农作区都被认为是一项关键的农业管理技术措施^[14-16]。面对中国日益严峻的水肥资源及环境危机,加强探索水氮协同效应及其机制,建立农田作物水氮协同管理模式,寻求实现水氮资源、环境与产量可持续发展目标的协调和统一,是国家农业发展面临的重大挑战。

1 氮肥过量使用对环境的威胁

中国是世界上氮肥使用量最多的国家,占世界年用量的 1/3,是能源消费大国,氮素引发环境问题尤为突

出,如氧化亚氮迁移至大气,增强温室效应,且扰乱臭氧层;氮氧化物向水体迁移,影响饮用水质量,且造成水体富营养化;从陆地迁移到大气的氨和氧化氮沉降到陆地和海洋,影响森林生态系统的功能,且加剧水体富营养化。据统计,中国的 532 条河流中,82% 受到不同程度的氮污染^[17]。据朱兆良等分析,在每年进入长江和黄河的氮素中,分别有 92% 和 88% 来自于农业,特别是化肥氮约占 50%^[18]。此外,据 1996 年 IPCC(报告^[19],土地利用方式改变(如林草植被减少和农耕地增加)和集约化农业生产对温室气体排放具有重大影响,温室效应的约 20% 与农业活动有关。如农业活动对二氧化碳排放的贡献为 21%—25%,对甲烷排放的贡献为 55%—60%,氮肥(和粪肥)施用对氧化亚氮排放的贡献高达 65%—80%^[20]。因此,如何减少农业生产对化肥尤其是氮肥的依赖,减轻氮素循环对生态环境的负面影响,发挥氮肥对农业及环境持续发展的积极贡献已经引起中国乃至全球各国政府和科学家高度关注。实现肥料减施增效不仅是国家粮食安全和农业可持续发展重大需求,并且影响到世界粮食安全、资源和环境可持续发展。

2 主要耗肥作物及其氮肥管理

世界上,小麦、玉米和水稻是主要的耗肥作物,在总的作物肥料消费中占 50%。在中国,玉米或小麦和小麦-玉米轮作为主要的种植制度。据中国统计年鉴 2008,小麦和玉米分别占总的粮食作物面积的 22% 和 27%,占总的粮食生产的 22% 和 30%^[21]。华北平原为主要的集约化灌溉农田冬小麦/玉米栽培模式地区之一,是中国化肥施用量较大的粮食高产地区之一。该区多数农田因长期氮肥过量或不合理施用,导致土壤氮流失、水质下降、能源和资源浪费严重。据中国科学院石家庄农业现代化研究所调查,目前华北平原高产地区年氮投入已经超过 500—600 kg·hm⁻²·a⁻¹^[19,22-23]。张玉铭等对 1985—2000 年在华北太行山前平原(河北栾城县)农田氮素养分平衡分析表明,长期过量施用氮肥的农田氮素平衡已经由 1985 年的 1.4% 赤字转变为 2000 年盈余约 49%^[22];胡春胜等的观察发现,农田 80 cm 和 140—160 cm 处土层为 NO₃⁻-N 高度聚集层^[23];田间试验测定表明,该区农田土壤氮肥损失以氨挥发(约 15%)和氮淋溶(约 9%)为主,加之反硝化损失(约占 1%)^[23],每年氮肥损失约占施氮量的 25%(若以施氮量 500—600 kg·hm⁻²·a⁻¹ 计算,氮损失高达 125—150 kg/hm²)。另据中国农业大学张福锁等调查数据显示^[9],农民传统的冬小麦施肥措施是:底肥施用 100—150 kg/hm² 的氮,而追肥施用 150—250 kg/hm² 的氮,华北平原冬小麦传统施氮总量平均为 369 kg/hm²,如果以氮肥施用量 250 kg·hm⁻² 为适宜用量,施氮过量的农户约占到 90%。传统的夏玉米施肥是苗期施用 150 kg/hm² 的氮,而追肥施用 150 kg/hm² 的氮,华北平原夏玉米传统施氮总量平均为 244 kg/hm²。如果以氮肥施用量 250 kg/hm² 为适宜用量,施氮过量的农户约占到 60%。小麦和玉米的氮肥利用率分别为 14% 和 20%,建议在优化施肥条件下氮肥利用率可达到 50% 和 34%,可分别提高 36 和 14 个百分点。然而,不同水热资源条件下,不同土壤肥力水平下,不同灌溉模式和氮肥管理措施下作物对氮肥反应也不同。

3 国内外农田水氮关系研究

中国小麦/玉米农田水肥关系研究始于 20 世纪 80 年代末,主要是针对中国旱农地区水资源亏缺和施肥效益低的问题而提出,重点是解决如何“以肥调水,以水促肥”,提高降水利用效率^[10,24-27]。20 世纪 90 年代,鉴于旱地农田土壤-作物水肥关系的复杂性,以及中国旱农地区水资源日益短缺,而农作物生产对氮肥依赖日益增加的特点,加之地区水肥资源经济合理配置的需求,水肥耦合技术已经被视为旱农地区作物生产的一项重要管理措施^[14,28-29]。由于中国地区土壤气候条件的差异性,不同地区作物水肥限制因素主次关系不同,水肥调控管理重点及模式也不同,近 20a 来,水肥调控技术应用研究在中国北方半干旱及半湿润偏旱的不同旱农类型区广泛展开^[10-13,30-31],许多研究观测到水氮互作存在明显的正交互作用,并且研究已经从雨养农区水肥管理发展到节水灌溉农田氮肥管理方面,农作物产量、水分(或灌溉)利用效率一直为关注的重点^[32-33]。随着栽培技术的不断发展,特别是 3S(RS、GIS、GPS)技术在农业生产中的应用,如利用地物光谱遥感估测叶片或植株冠层的水肥状况进行实时监测和快速诊断,为实现农田水肥精准管理和决策提供依据,也受到国内学者的关注^[34]。如通过红外测温仪测定冠层温度来反映植株水分,发现不同水肥处理下冬小麦冠层含水率与冠层温度存在着负相关关系^[35]。还有学者通过对不同水氮模式处理下冬小麦冠层结构和光分布的差异分

析,为作物水氮监测和管理提供方法和依据^[36]。此外,在大田试验研究基础上,建立水肥耦合数学模型^[37-45]以及区域农田水氮管理模型研究^[46-50]也开始得到重视。近年来有学者^[51]对不同水氮环境下小麦氮素含量和氮素利用效率的遗传模型研究,发现小麦氮素含量和氮素利用效率的遗传模型在不同水氮环境中不完全一样。

在中国随着灌溉农区氮肥环境污染问题日益暴露,小麦/玉米灌溉农田水肥关系研究也逐渐关注到氮肥淋失以及氮肥利用率问题^[52-60]。研究表明,水和氮与作物产量在一定范围呈正相关,表现为水氮协同效应;然而,水氮过量则会导致作物产量反应消减或出现产量与水氮负相关。如沈荣开等^[12]于1998—2000年在北京市永乐店冬小麦和夏玉米水肥耦合田间试验资料表明,氮肥效益的发挥与农田水分状况密切相关,不同的农田水分状况,相同的施氮量所获得的产量是不相同的;氮肥肥效一般随灌水量的增加而提高。研究发现试验条件下,增加灌水量的增产幅度大于增加施肥量;相对于高供水处理(如灌3次(返青、拔节和灌浆)或4次(返青、拔节、孕穗和灌浆)水),低供水水平下(如灌1次(拔节)或2次(拔节和灌浆)水),氮肥的增产效益比较显著,但氮肥贡献率有随着施肥量的增加而呈递减趋势。李永宾等^[61]于2002—2004年在北京东北旺对冬小麦水氮管理模式研究,该区优化灌溉与传统灌溉处理相比灌溉效益不明显,而水氮交互效应及氮肥效应显著,适量增施氮肥,增产潜力较大,并有利于提高水和氮利用率,同时也表明节水灌溉潜力还有待挖掘。近年来对北京地区冬小麦和夏玉米田块调查资料表明^[62-63],平均氮肥用量分别为309、256 kg/hm²,氮肥利用率仅为16%—22%,低于30%—41%的全国水平;其中大部分田块作物产量对施氮量反应不明显,由于每年投入大量氮肥,而氮肥使用量超过了作物的需要量,造成氮素盈余或残留量急剧增加,致使土壤中NO₃-N大量累积及其对地下水污染带来威胁。由上研究暗示,中国华北地区集约化灌溉农田冬小麦/玉米种植生产体系节水减肥增效还有很大空间。据有关专家分析,中国目前粮食作物产量潜力仍未充分挖掘,实际产量仅发挥了高产潜力的50%左右,提高作物产量是提高肥料利用效率的重要途径^[6]。水氮关系研究还发现,水氮吸收及其水氮利用效率(率)峰值与作物产量峰值并非完全吻合^[52-54]。氮肥利用率随灌水量递增而提高,而水分利用效率随施氮量递增而提高^[11,15-16,25]。然而,氮肥利用率随施氮量递增而降低^[25,56,64-67];同样,水分利用效率随降水/灌水量递增而降低^[11,27,34,52]。可见,氮肥利用率和水分利用效率双赢、同时满足作物高产和资源环境安全目标是有矛盾的,有待进一步揭示水氮协同效应及其机制,寻求实现水氮资源、环境与产量可持续目标的协调和统一。

国外早在20世纪60年代就开始在干旱地区,针对作物施肥及水分利用低效问题而提出水氮关系研究^[67-70]。随着信息技术的快速发展和3S技术等在生产中的应用,发达国家于20世纪80年代中期开始提出了精确农业的概念,开展了精确氮肥管理技术研究,尤其在与GIS和GPS结合后,可以实现农田水氮精确管理,不仅能保证作物产量和品质,还可以节约资源,降低成本,提高氮肥和水分利用效率,减少对环境的污染^[34]。近20a来,随着全球气候变化、水资源短缺、氮肥过量带来的水体和环境污染等问题日益突出,水氮关联研究在灌溉农田水氮效应、氮淋失及氮肥利用率、以及水氮协同机理等方面不断引起关注和深入^[71-85]。如Norwood^[76]对美国大平原有限灌溉和旱作条件下的玉米水分利用及产量研究显示,在地下水日趋减少、灌溉水有限的地区,通过配合适量施肥和调整种植密度可作为一种水浇地转为旱地的玉米产量保障的可替代措施。Nangia等^[86]对美国佛罗里达州雨养条件下作物氮响应的最近研究得出,实际生产中的作物水分利用效率及收获指数并不是常数,水分生产力(即使在高产条件下)或水分利用效率(在作物用水低下的条件下)均可通过适量施用氮肥而得到提高或改善。据Kima等^[85]最近研究,水氮协同关系对水氮利用效率的影响机理在于:(1)植物对水氮响应是同时发生的;(2)氮肥可增加水分利用效率;(3)水分可提高玉米吸收土壤氮和肥料氮的能力。在水分充足条件下N的利用效率较高,这与增加了总的生长和蒸散量,且增加了氮随水分向根系的转移有关。近些年来,水氮关系研究,特别是运用土壤-作物系统水氮模型进行农田或区域尺度的作物水氮管理模拟、预测和评估,改善作物水氮利用效率(率)等方面至今仍为国际上研究的热点(表1)^[86-111]。

表 1 主要作物水氮管理模型工具及其作物水氮关系模拟研究

Table 1 Recent studies on crop water and nitrogen management models and simulation

模型工具 Simulation models	模型简述 Model description	模型应用/验证 Application/validation
VSM 模型 (A very simple model)	Kobayashi((1994) 研发用于水稻作物水氮关系研究 ^[87]	Pirmoradian 和 Sepaskhah ^[88] 采用 VSM 模型对伊朗法尔斯省不同水氮应用管理下水稻生产模拟研究
CERES-小麦模型、CERES-水稻模型 (Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis, CERES)	1994 由 IRRI (the International Rice Research Institute) 和 IFDC (the International Fertilizer Development Centre) 合作开始稻-麦连作体系水氮关系模拟研究 ^[89]	Timsina 和 Humphreys ^[89] 综述在亚洲地区国家和澳大利亚对 CERES-稻-麦连作体系模型验证和应用; Arora 等 ^[90] 采用 CERES-小麦模型对半干旱亚热带环境下小麦生产力对气候、灌溉和氮肥响应的模拟分析; Behera 和 Panda ^[91] 采用 CERES-小麦模型对亚热带半湿润地区灌溉小麦水肥管理试验和模拟
CERES-玉米模型	修正的玉米模型用于作物产量和水分利用效率模拟研究 ^[92]	Ritchie 和 Basso ^[93] 采用 CERES 玉米模型对美国中西部气候下玉米遗传类型、产量和水分利用效率的影响进行模拟研究
DSSAT 模型 (Decision Support System for Agro-technology Transfer)	美国国际开发署 (USAID) 项目 (1983 — 1993) 由 IBSNAT (International Benchmark Systems Network for Agrotechnology Transfer) 研发 ^[94-95]	Nangia 等 ^[86] 采用 DSSAT 模型对美国佛罗里达州雨养条件下改善玉米氮肥管理对水分生产力的影响进行了模拟研究; Sarkar 和 Kar ^[96] 利用 DSSAT 对印度西孟加拉邦可持续稻麦轮作体系作物残茬和氮管理策略进行研究
RZWQM 模型 (Root Zone Water Quality Model)	美国农业部农业研究服务局 (USDA-ARS) 研发用于作物根区水氮循环研究 ^[97]	Ma 等 ^[98] 采用 RZWQM 模型对美国爱荷华州东北部长期作物生产、水和氮平衡进行了模拟研究; Cameira 等 ^[99] 利用 RZWQM 模型对地中海地区葡萄牙农业土壤-玉米作物系统氮去向进行模拟评价
WNMM 模型 (Water and Nitrogen Management Model)	澳大利亚研发的用于水稻作物水氮研究模型	Li 等 ^[100] 采用 WNMM 模型对中国华北平原灌溉集约化种植制度下的水氮管理的空间变化的模拟研究
APSIM 模型 (Agriculture Production Systems SIMulator)	由 APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit) 研发用于雨养种植体系及灌溉作物水氮关系研究 ^[101]	Moeller 等 ^[102] 采用 APSIM-Nwheat 模型对澳大利亚西南部地中海环境下播前土壤中植物有效水分能否作为小麦优化氮肥管理和作物播种管理决策依据进行模拟研究; Akponikpe 等 ^[103] 采用 APSIM 模型对尼日尔萨赫勒地区珍珠粟氮肥管理进行长期预测模拟
EU-Rotate_N 模型/Hydrus-2D 模型	EU-Rotate_N 模型 (基于作物模拟模型) 用于欧盟蔬菜作物轮作体系优化施 N 肥 ^[104] 和 Hydrus-2D 模型 (溶质运移) ^[105-106]	Doltra 和 Muñoz ^[107] 采用欧盟 Rotate_N 和 Hydrus-2D 模型对地中海气候条件下的施肥灌溉 (fertigated) 甜椒、花椰菜作物地氮淋失进行了模拟研究
DANUBIA 作物生长模型	由 GECROS 模型和 CERES 结合开发而成的作物生长模型, 作为应对气候变化的决策支持系统 ^[108]	Lenz-Wiedemann 等 ^[108] 采用 Danubia 模型研究作物对气候变化和栽培措施改变的响应, 利用田间实测作物水氮需求时空变化与模拟值比较和对模型进行验证
SMCR N 模型	农业水文模型, 可模拟多种作物的土壤-作物系统水氮动力学过程, 用于优化农业资源利用管理评价 ^[109]	Zhang ^[110] 和 Zhang 等 ^[111] 利用小麦田间试验测定数据, 对 SMCR N 模型在土壤-小麦系统水氮循环过程模拟结果的验证

4 华北平原水热特征及氮肥对粮食产量和水氮利用效率影响分析

根据统计数据和文献资料, 调查研究华北平原地区 (以河北省统计调查资料和研究数据分析为例) 年水热条件 (不同年降水量和年平均气温) 变化、年氮肥用量、年粮食产量, 以及降水生产效率 (PUE) 和氮肥利用效率 (NUE, 用氮肥偏生产力 PFPN (Partial Factor Productivity from Applied N) 来表征) 等, 以探明年水热条件变化和年氮肥用量与粮食产量和水氮利用效率之间的关系及其影响趋势。

4.1 华北平原水热条件特征

根据中国统计年鉴资料统计^[112], 华北平原 (以河北石家庄气象数据统计) 近 20a 来 (1988—2007 期间) 气候变化特征如图 1 所示, 年平均气温变化呈逐年上升趋势 (以平均约 0.065℃/a 的速度上升), 1988—2007 年期间, 年平均气温上升约为 1.6℃ (从 13.3℃ 上升到 14.9℃) (图 1a); 而年降水量变化呈逐年下降趋势 (以平均约 4.76 mm/a 的速度减少), 从 492 mm 下降到的 430 mm (图 1b)。尽管有效灌溉面积逐年增加 (以河北省 1993—2007 资料统计^[112] 计算得出: $y(\text{有效灌溉面积}, 1000 \text{ hm}^2) = 43.5x(\text{年份}) - 82644, R^2 = 0.778$), 但年平均灌溉水量 (农业用水总量/有效灌溉面积) 呈逐年下降趋势 (以平均约 5.83 mm/a 的速度减少), 2002—

2007 资料统计^[112],从 366 mm 下降到的 339 mm(图 1b)。据文献资料显示^[113],华北平原气候变暖主要表现在冬季。如 1961—1999 年河北辛集极端气温年代变化资料显示,极端最低气温变化由 20 世纪 60 年代的 -22°C 上升到 20 世纪 90 年代的 -12.9°C ,增幅达 9.1°C ;而期间极端最高气温由 41.9°C 下降到 41.0°C ,降幅约为 0.9°C 。气候变化也影响到地下水位动态变化。华北平原在地下水开采、地表水利工程、降水、蒸发等因素影响下,地下水位下降、地表水干枯、水资源供给不足等问题越来越突出^[114]。如石家庄地下水降落呈漏斗型;20 世纪 60 年代初,华北山前平原区浅层地下水埋深在 1—10 m 之间;1984 年该区浅层地下水位普遍下降 5—20 m;2001 年该区浅层地下水埋深已达 40 m。地下水位平均每年以约 1.2 m/a 的速度下降。气候变化通过水资源、热量条件变化直接影响农业生产,如作物水分亏缺程度随气候变暖而逐年增加。华北平原区水资源短缺、灌溉水源不足与作物高产灌溉水需求增加的矛盾日益上升,对粮食安全生产构成威胁。

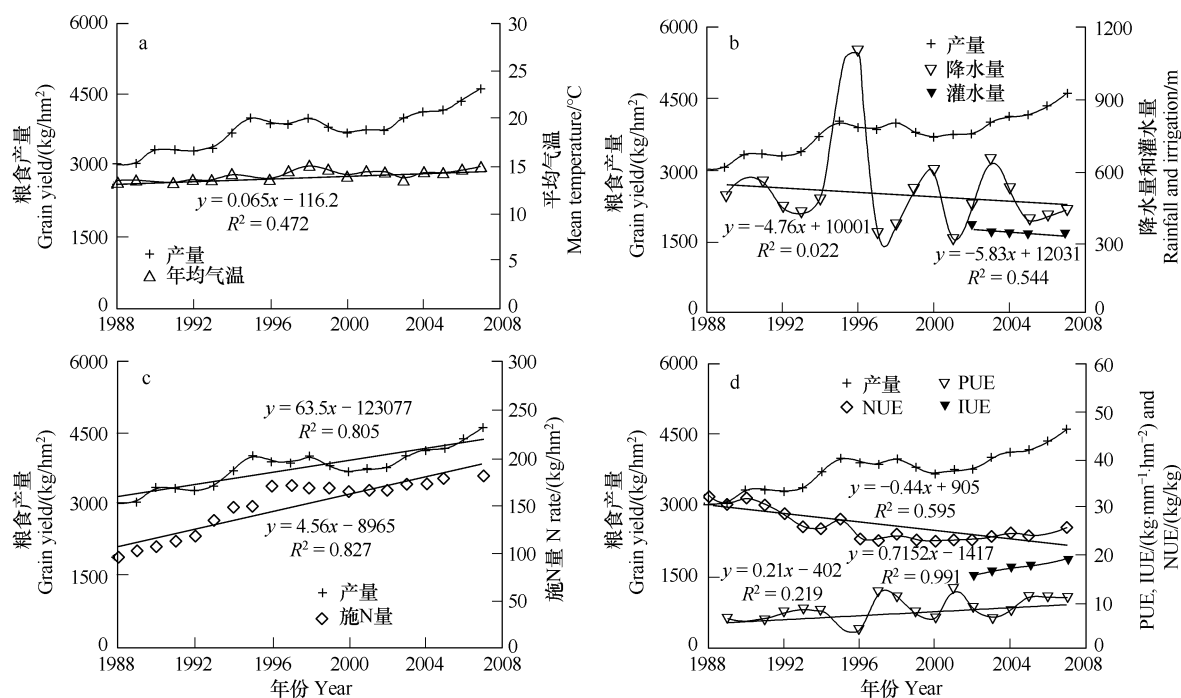


图 1 华北平原(河北省)年水热条件变化与氮用量及灌水量对粮食产量、降水/灌溉水生产效率(PUE/IUE)和氮肥利用效率(NUE)的影响^[112]

Fig. 1 Effects of climate conditions and N rates on food grain yields (GY), Precipitation use efficiency (PUE), irrigation water use efficiency (IUE) and N use efficiency (NUE) in North China Plain (Hebei, China)^[112]

a: 年均气温与粮食产量;b: 年降水/灌水量与粮食产量;c: 施 N 量与粮食产量;d: 水/N 利用效率与粮食产量)

4.2 华北平原氮肥用量与粮食产量及水氮利用效率(率)

1988—2007 年期间(以河北省历年相关数据统计^[112]),年粮食产量随年平均施氮量的增加呈逐年上升趋势,氮用量年均增加约为 $\text{N } 4.56\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (从 $95\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升到 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)(图 1c),粮食增产年均约为 $63.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (从 $3037\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升到 $4360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$);氮肥利用效率(NUE)年均下降约为 $\text{N } 0.44\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (从 32 下降到 $26\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)。1988—2007 年期间,年氮肥用量的增长速度(约 1.9 倍)超过了年粮食增产速度(约 1.5 倍);粮食产量的增加是以 NUE 的明显下降为代价的(图 1d),同时也增加了环境和经济的压力。由图 2 也可看出,1988—2007 年期间,NUE 随单位氮用量增加呈显著下降趋势,说明作物增产的同时氮肥效应呈明显递减,而年降水生产效率(PUE)和灌溉水生产效率(IUE)的氮肥响应均与年氮肥增产趋势一致。PUE 随年施氮量增加呈上升趋势(图 1c 和 1d),年均增加约为 $0.21\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (从 $6.2\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 上升到 $10.7\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$);在一定施氮量范围(如 1996 年以前,氮用量 160

kg/hm²时),PUE 与施氮量之间呈较好的正相关(图 2)。根据 2002—2007 年统计数据^[112],此间 IUE 随年施氮量增加呈明显上升趋势(图 1c 和 1d),年均增加约为 0.72 kg·mm⁻¹·hm⁻²·a⁻¹ (从 15.1 kg·mm⁻¹·hm⁻²·a⁻¹ 上升到 18.7 kg·mm⁻¹·hm⁻²·a⁻¹),IUE 与施氮量之间呈显著正相关(图 2)。

4.3 水热条件及氮肥用量与粮食产量和水氮利用效率的关系

1988—2007 年期间华北平原年水热条件、氮肥用量及灌水量与年粮食产量、PUE、IUE 和 NUE 的相关分析表明(表 2),年粮食单产与年平均气温呈极显著正相关($r=0.726^{**}$),而与年降水量相关性不明显($r=-0.031$)。这与杨新和延军平^[113]根据 1957—1999 年气象资料分析河北辛集小麦单产与年均气温和年降水量之间相关系数分别为 0.61 和 0.058 的结果相一致。分析表明华北平原年均气温升高对小麦生长有利,而年降水量与小麦单产关系不明显。由于季风气候的影响,降水量集中于 7—9 月份,小麦生长期(10 月—翌年 6 月)降雨量仅能满足小麦蒸散量的 26%,水分的亏缺量高达 340 mm,必须通过灌溉来解决,因此华北平原小麦生产与年降水量关系不大。

表 2 还显示,1988—2007 年期间华北平原年粮食单产随年氮肥用量增长而呈明显增长趋势($r=0.90^{**}$),但 NUE 与氮用量呈极显著负相关($r=-0.92^{**}$)。此间随年平均气温变化(上升趋势)和年降水量变化(下降趋势),PUE 和 NUE 分别呈上升和下降趋势,PUE 和 NUE 分别与年均气温变化呈极显著正相关($r=0.72^{**}$)和显著负相关($r=-0.60^{*}$);而且 PUE 和 NUE 与粮食产量的关系也分别表现为正相关($r=0.45^{*}$)和极显著负相关($r=-0.67^{**}$)。可见,1988—2007 年期间华北平原年氮肥增产趋势与年平均气温变化趋势基本一致,而与年降水变化趋势不相吻合,也与年均灌溉水量减少趋势不相吻合(表 2)。

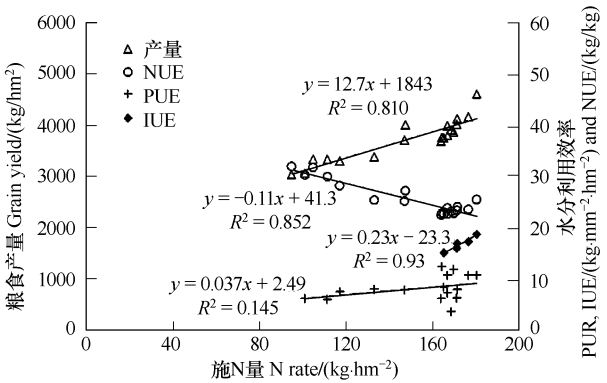


图 2 华北平原(河北省)粮食产量、降水生产效率(PUE)、灌溉水生产效率(IUE)和氮肥利用效率(NUE)与氮肥用量的关系
Fig. 2 Relationships between N rates and food grain yields, Precipitation use efficiency (PUE), irrigation water use efficiency (IUE) and N use efficiency (NUE) in North China Plain (Hebei, China)

数据来源:中国统计年鉴,1989—2008^[112]

表 2 华北平原(河北省)年水热条件和年降水量、氮用量及灌溉水量与年粮食产量和水氮利用效率的相关性分析^[112]
Table 2 Correlation coefficients (r) for climate conditions (mean temperature and annual rainfall), N rates, irrigation rates, food grain yields, Precipitation use efficiency, irrigation water use efficiency and N use efficiency in North China Plain (Hebei, China)

	粮食产量 Grain yield	年均气温 Mean air temperature	年降水量 Annual rainfall	灌水量 Irrigation rate	氮用量 N rate	降水 生产效率 PUE	灌溉水 生产效率 IUE	氮肥 利用效率 NUE
粮食产量 Grain yield	1							
年均气温 Mean air temperature	0.726 **	1						
年降水量 Annual rainfall	-0.031	-0.491 *	1					
灌水量 Irrigation rate	-0.749	-0.090	0.002	1				
氮用量 N rate	0.900 **	0.707 **	0.053	-0.805 *	1			
降水生产效率 PUE	0.453 *	0.721 **	-0.824 **	-0.306	0.382	1		
灌溉水生产效率 IUE	0.983 **	0.617	-0.397	-0.785	0.964 **	0.700	1	
氮肥利用效率 NUE	-0.672 **	-0.595 *	-0.062	-0.679	-0.923 **	-0.289	0.934 *	1

注: PUE = Precipitation use efficiency 降水生产效率(单位降水量生产的粮食产量,kg·mm⁻¹·hm⁻²);IUE = Irrigation water use efficiency 灌溉水生产效率(单位灌溉水量生产的粮食产量,kg·mm⁻¹·hm⁻²);NUE = N use efficiency 氮肥利用效率(单位氮肥生产的粮食产量,kg·kg⁻¹); ** $r(0.01)=0.606$; * $r(0.05)=0.482$; ※ $r(0.10)=0.412$

由表 2 看出,PUE 和 IUE 一般均随年均灌溉水量减少和氮肥用量增加而提高。由此可知,在年降水和灌

灌溉水量呈逐年下降趋势下,年粮食单产的增加可通过氮肥提高作物水分(降水或灌溉水)利用效率而实现的。Wang 等^[115]通过对我国北方旱地农田养分管理 15a 长期试验得出,雨养条件下作物水分利用效率(WUE)因季节降水变化而呈一个变数。WUE 变化范围可从干旱年平衡施肥处理的 $40 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 变为湿润年对照处理的 $6.5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$; 15a 平均 WUE 变化范围在 $11\text{--}19 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$; 平衡施肥(如化肥、秸秆和牛粪合理配施)下的 WUE 为最高。国内先前的研究也表明了水分利用效率与施氮量的正相关^[11,15-16,25]。国外的相关研究也有类似的结果,如美国 Norwood 和 Nangia 等^[76,86]研究表明,无论在有限灌溉条件下或雨养条件下,作物的水分生产力或水分利用效率均可通过适量施用氮肥而得到提高或改善;Kima 等^[85]研究指出,水分可提高玉米吸收土壤氮和肥料氮的能力,在水分充足条件下 N 的利用效率较高。

5 结论与建议

近 20a 来,中国水氮调控技术研究已经从雨养农区水氮管理发展到节水灌溉农田氮肥管理,并且随着中国灌溉农区氮肥环境污染问题突出,水氮关系研究不再只是注重旱地农田作物产量、水分利用效率,而更多的关注到集约化灌溉农田的水氮环境及其管理问题。与国外水氮协同研究相比,中国在农田或区域作物水氮协同管理模型模拟、预测预报、实时监测和诊断等方面研究还较薄弱。尤其面对当前全球气候变暖、水资源短缺、氮肥施用过量等引发的环境问题,农田水氮关联研究及其管理等方面仍为国际上研究的热点。

水氮关系研究表明,水和氮与作物产量在一定范围表现为水氮的协同效应;水氮协同关系对水氮利用效率有一定影响。水氮利用率双赢,同时满足作物高产和资源环境安全目标存有矛盾,且受到地区土壤气候的差异性、不同水热资源下作物水氮限制因素及其调控管理模式的特殊性、以及农田土壤-作物水氮互作间关系的复杂性等制约。

统计资料显示,1988—2007 年期间华北平原年粮食单产与年平均气温呈极显著正相关,而与年降水量相关性不明显。PUE 和 NUE 随年水(下降趋势)热(上升趋势)变化分别呈显著上升和显著下降趋势。PUE 和 NUE 与粮食产量的关系分别为较好正相关和极显著负相关。PUE 和 IUE 一般随年均灌溉水量减少及氮肥用量增加而提高。适量节水和减氮分别有助 PUE(或 IUE)和 NUE 的改善,尤其在气候变暖、变干的条件下,适量施氮成为改善水氮利用效率的关键对策。

目前中国华北集约化灌溉种植区,由于每年氮肥投入过量,土壤氮素盈余严重,大部分田块作物产量对施氮量反应不明显;同时,由于灌溉不合理,也有田块表现为作物灌溉效益不明显。暗示该区灌溉农田冬小麦/玉米种植生产体系节水减肥增效存在很大空间。研究建议,合理施肥数量应以地区水分(或灌溉)条件为前提(依水调控),减氮的原则应建立在经济施肥目标产量(获取最佳产量)的基础上(一般也是水分利用效率最大时)。此外,提高肥料利用率可以通过改善肥料种类(如利用缓释肥料^[116-117]、脲酶抑制剂^[118-120]、水肥调理剂等^[121])、养分元素合理搭配(如测土配方施肥、有机与无机肥配施^[5,122])、精确施肥^[123-124]、诊断施肥(如 SPAD 叶绿素、NDVI 植被指数、冠层光谱等诊断^[34-35,125-130])、灌溉施肥、旱地响应式施肥管理(Response nutrient management,如分次施肥等^[11])、水氮管理模型预测施肥管理(如 DSSAT 模型、APSIM 模型、WNMM 模型等^[86-111])等水氮协同调控管理技术。然而,水肥资源耦合的合理配置是一个非常复杂的问题,还需要通过区域范围田间试验研究和模型分析,因地(气候、土壤、作物等)而宜进行调控。因此,通过研究特定水氮高投入模式下作物的气候环境适应力,作物产量与水氮利用效率(率)协同关系,确定不同灌溉模式下的土壤-作物水氮协同的参数范围,建立以资源、环境和产量持续发展为目标的水氮协同管理模式,发展农田作物水氮实时监测和光谱诊断等实用新型技术,采用作物水氮协同管理模型模拟预测手段,发挥或挖掘作物水氮协同效应或潜力以及水氮利用效率(率),仍然是当前中国土壤、肥料及水管理研究领域面临的机遇和挑战。

References:

- [1] Lin B. Chemical fertilizer and pollution-free agriculture. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2003: 1-8.
- [2] Ye Q L, Rozelle S. Fertilizer demand in China's reforming economy. Canadian Journal of Agricultural Economics, 1994, 42: 191-207.
- [3] FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). FAO Statistical Yearbook 2004, vol 1. Roma, Italy: FAO, 2005: 364.

- [4] Heffer P, Prud'homme M. Medium-term outlook for global fertilizer demand, Supply and Trade, 2006—2010, Summary Report. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, [74th IFA Annual Conference Cape Town, South Africa, 5—7 June 2006]. www.fertilizer.org/ifa/publicat/PDF/2006_cape_town_ifa_summary.pdf. 2006.
- [5] Lin B, Li J K, Jin J Y. Outlook on fertilizer use in China in next century//Research Progress in Plant Protection and Plant Nutrition. CAAM. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 345-351.
- [6] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang F R. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [7] Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Integrated soil nutrients management and China's food security. *Resources Science*, 2008, 30(3): 415-422.
- [8] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, Xu J F, Shi L W, Li J L. Analysis on fertilizer applied and the central factors influencing grain yield of wheat in the northern China plain. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(Supplement): 224-229.
- [9] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Ma W Q. Current status and strategies of nutrient resource sustainable use in China. [2006 World Fertilizer Conference, 27 February-2 March 2006] http://www.fertilizer.org/ifa/chinese_portal/PDF/C-2006_ag_kunming_zhang.pdf, 2006.
- [10] Wang X B, Gao X K. The effect of interrelationship between water and fertilizers on crop growth in dry farmland. *Chinese Journal of Agricultural Research in the Arid Areas*, 1993, 3: 6-12.
- [11] Wang X B, Hoogmoed W B, Cai D X, Perdok U D, Oenema O. Crop residue, manure and fertilizer in dryland maize under reduced tillage in northern China: I Grain yields and nutrient use efficiencies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2007, 79: 1-16.
- [12] Shen R K, Wang K, Zhang Y F, Yang L H, Mu J Y, Zhao L X. Field test and study on yield, Water use and N uptake under varied irrigation and fertilizer in Crops. *Transaction of the CSAE*, 2001, 17(5): 35-38.
- [13] Wu D T, Li H M, Jiao X Y, J X Y, Zhou H P. Relationship between water and fertilizer for wheat and effect on wheat yield in rainfed field of Loess Plateau. *Transaction of the CSAE*, 2001, 17(5): 39-42.
- [14] Wang D S. The principles and techniques of water and fertilizer management on dryland. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1995.
- [15] Wu J C, Zhu H G, Yang Z P. Study on water and fertilizer use efficiency of wheat under different water and fertilizer conditions. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2003, 18(4): 95-98.
- [16] Zhan Q H, Chen J. Effect of coordination of water and fertilizer on maize yield and theirs utilization efficiency. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2005(4): 14-18.
- [17] Zhang Z Y, Shi Z X, Zhou Q. Impacts of agrochemical on environment & human health and relevant strategies. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(2): 73-77.
- [18] Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, Zhang L X. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. *Science & Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.
- [19] IPCC. Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical Analyses// Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H eds. Contribution of Working Group II of the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1996: 880.
- [20] OECD. Agriculture and the Environment: Issues and Policies. Paris: OECD, 1998.
- [21] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook-2008. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [22] Zhang Y M, Hu C S, Mao R Z, Dong W X. Nitrogen, phosphorus and potassium cycling and balance in farmland ecosystem at the piedmont of Taihang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1863-1867.
- [23] Hu C S, Cheng Y S, Yu G R. Effects of nitrogenous fertilizer application on nitrate-N concentration of soil solution in north China. *Resources Science*, 2001, 223(6): 46-48.
- [24] Wang X B, Gao X K. The effect of fertilization under soil water stress. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1988, 4: 22-26.
- [25] Wang X B, Gao X K. Crop growth responses to soil water and fertilizer in dry farmland// A Collection of Master Theses of Excellence (1987—1988), Vol. 2. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 1989: 71-78.
- [26] Wang X B, Gao X K. The problems of soil moisture and nutrient in dry farmland. *Shanxi Agricultural Science*, 1991, 8: 33-36.
- [27] Wang X B, Cai D X, Gao X K. Effects of water and fertilizers on nutrient uptake by crops//The Principles and Techniques of Water and Fertilizer Management on Dryland. Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 1995: 161-165.
- [28] Meng Z J, Jing J J, Sun X M. Water-fertilizer interaction and related techniques for water-saving and high-yield winter wheat-summer corn cropping system. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 1997, 6: 4-7.
- [29] Mu X M. Effect of Coupling Water and Fertilizer and Field Management. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.
- [30] Xing W Q, Wang L Q, Luo Y M, Li L P, Li S X. Effect of special coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semiarid area.

- Transaction of the CSAE, 2002, 18(6): 46-49.
- [31] Ma Q, Yu W T, Shen S M, Zhang L, Zhou H. Effects of water and nutrient interaction on maize yields in lower reach of Liaohe River Plain. Transaction of the CSAE, 2007, 23(4): 29-33.
- [32] Zheng J, Li G Y, Han Z Z. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops. Transaction of the CSAE, 2008, 24(11): 46-50.
- [33] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, Guo R P. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 134: 67-78.
- [34] Xue L H, Luo W H, Cao W X, Tian Y C. Research Progress on the Water and Nitrogen Detection Using Spectral Reflectance. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(1): 73-80.
- [35] Zhao C J, Huang W J, Wang Z J, Wang B H, Wang J H. Relationship between canopy water content and temperature of winter wheat under different water and nitrogen treatments. Transaction of the CSAE, 2002, 18(2): 25-28.
- [36] Li Z Y, Guo Y X, Wang P, Zhai Z X, Marion B Z. A comparative study of canopy structures of winter wheat under different models of irrigation and N fertilization. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(6): 1085-1088.
- [37] Yang C F, Meng Z J. Study on the relationship of time and quantity of water and fertilizer applied for the winter wheat. China Rural Water and Hydropower, 1992, 3: 9-11.
- [38] Li Z Z, Zhao S L. Crop growth model and the regulation of water and nutrients in farmland in semi arid region. Acta Prataculturae Sinica, 1994, 3(1): 7-12.
- [39] Zhou J, Huang D M, Xu Q M, Yang R Q, Chen H J. Experimental research on water_fertilizer mechanism of winter wheat. Transaction of the CSAE, 1994, 10(1): 44-49.
- [40] Meng Z J, Liu A N, Wu H Q, Yang C F, Jia D L, Si T S. Mathematical model of water-fertilizer interaction for water-saving and high-yield winter wheat in east area of Henan province. Transaction of the CSAE, 1998, 14(1): 86-90.
- [41] Meng Z J, Liu A N, Wang H Z, Pang H B, Jia D L. Mathematical model of water-fertilizer interaction for water-saving and high-yield winter wheat-summer corn cropping system. China Rural Water and Hydropower, 1999, 11: 15.
- [42] Zhao G Q, Zhu Z X, Deng T H, Fang W S, Hou J X. The influences of water and nitrogenous fertilizer on winter wheat yield and the controlling technique. Journal of Applied Meteorological Science, 1999, (3): 314-320.
- [43] Li H, Zhou L D, Zhang Y S. Modelling of regulation-controlling soil moisture and fertilizer in grain farmlands in plain areas of Beijing suburbs. China Rural Water and Hydropower, 2002, 1: 43-44.
- [44] Liu W Z, Li Y S, Li S X. Graphical presentation and their characteristics of the coupled zones for optimal supplies of water and nutrients to crops. Transaction of the CSAE, 2002, 18(6): 1-3.
- [45] Liu W Z, Li Y S. Coupled effect for supplies of water and nutrients to crop in the west of weibei rainfed tableland. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 12-15.
- [46] Huang Y F, Li Y Z, Li B G, Chen D L. Simulation of regional soil water and nitrogen behaviors in agricultural field. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 11: 87-92.
- [47] Gao R T, Chen H W, Li B G, Huang Y F. Simulation and analysis of soil water and nitrogen behaviors in winter wheat-growing season in Huang-Huai-Hai Plain. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 552-562.
- [48] Chen Y, H K L, Feng L, Li B G. Optimal management of water and nitrogen for winter wheat based on simulation model in soil-plant system in agricultural field. Transaction of the CSAE, 2007, 23(6): 55-60.
- [49] Hu K L, Li B G, Chen W, Gou Y Q. Coupled simulation of crop growth with soil water-heat-nitrogen transport I Model. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 23(6): 55-60.
- [50] Jin L, Hu K L, Li B G, Gong Y S. Coupled simulation on crop growth and soil water-heat-nitrogen transport. II Model validation and application. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8): 972-979.
- [51] Hao X, Dong Z D, Li Y, Cui D Q. Genetic model of nitrogen concentrations and nitrogen utilization efficiency of wheat in different water and nitrogen environment. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(4): 103-106.
- [52] Jia S R, Meng C X, Tang Y X, Liu C S. Space-time relations of water and nutrient in wheat field and ways for their management. Eco-Agriculture Research, 1995, 3(3): 62-66.
- [53] Jia S L, Meng C X, Tang Y X, Liu C S. Effects of water stress on wheat yield and the characteristic of nutrient absorption. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(1): 6-8.
- [54] Tang Y X, Meng C X, Jia S R, Liu C S. Different responses of wheat to water and fertilizer and technique of fertilizer application to wheat with water-saving irrigation in winter. Chinese Journal of Agricultural of Agri Research in the Arid Areas, 1996, 14(2): 36-40.
- [55] Li S J, Zhou D X, Li J M. Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,

- 2001, 16(3): 86-91.
- [56] Li S J, Zhou D X, Zhu Y P, Li J M, Lan L W. Effects of Water and Nitrogen Application on Nitrogen Uptake and Distribution in Wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(1): 69-75.
- [57] Li Z Y, Wang P. Effects of the optimized water-fertilization and traditional water-fertilization on root growth, water and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2003, 9: 42-45.
- [58] Li Z Y, Chen J J, Wang P. Effects of the different irrigation-fertilization optimization models on grain yield, yield structure and water and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(2): 42-45.
- [59] Wang X Y, He M R, Liu Y H, Zhang H H, Li F, Hua F X, Meng S H. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 28(2): 685-694.
- [60] Pan J R, Ju X T, Liu X J, Chen X P, Zhang F S, Mao D R. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China Plain under optimization of irrigation and fertilization. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(2): 334-307.
- [61] Li Y B, Zheng L M, Liao S H, Zhu H, Liu H J. Effects of different patterns of irrigation and N application on grain yield and utilization ratio of water and nutrient of winter wheat in Beijing suburb. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(2): 51-56.
- [62] Zhao J R, Guo Q, Guo J L, Wei D M, Wang C W, Liu Y, Ling K. Investigation and analysis of input of chemical fertilizer and yield actuality in outskirts of Beijing. *Beijing Agricultural Sciences*, 1997, 15(2): 36-38.
- [63] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [64] Zhou L Y. The effects of soil water conditions on nitrogen fertilization use efficiency. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 1996, 10(1): 43-46.
- [65] Zeng X B, Li J M. Fertilizer application and its effect on grain production in different counties of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(3): 387-392.
- [66] Wang X F, Wu W L, Pan Z Y, Chen S F, Liu G D, Xiu X F. Effects of various water and nitrogen managements on growth of winter wheat and water use efficiency. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Supplement): 741-745.
- [67] Viets F G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Advances in Agronomy*, 14: 223-264.
- [68] Brown P L. Water use and soil water depletion by dryland wheat as affected by nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 1971, 63: 43-46.
- [69] Cooper J L. The effect of nitrogen fertilizer and irrigation frequency on a semi-dwarf wheat in South-east Australia. I. Growth and yield. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 1980, 20: 359-364.
- [70] Cooper J L. The effect of nitrogen fertilizer and irrigation frequency on a semi-dwarf wheat in South-east Australia. II. Australian journal of experimental agriculture and animal husbandry, 1980, 20: 365-369.
- [71] Bennet J M, Mutti L S M, Rao P S C, Jones J W. Interactive effects of nitrogen and water stresses on biomass accumulation, nitrogen uptake, and seed yield of maize. *Field Crops Research*, 1989, 19: 297-311.
- [72] Cartagena M C, Vallejo A, Diez J A, Bustos A, Caballero R, Roman R. Effect of the type of fertilizer and source of irrigation water on N use in a maize crop. *Field Crops Research*, 1995, 44: 33-39.
- [73] Schepers J S, Varvel G E, Watts D G. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1995, 20: 227-239.
- [74] Garabet S, Wood M, Ryan J. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate. I. Growth, water-use and nitrogen accumulation. *Field Crops Research*, 1998, 57: 309-318.
- [75] Garabet S, Ryan J, Wood M. Nitrogen and water effects on wheat yield in a Mediterranean-type climate. II. Fertilizer-use efficiency with labelled nitrogen. *Field Crops Research*, 1998, 58: 213-221.
- [76] Norwood C A. Water use and yield of limited-irrigated and dryland corn. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 365-370.
- [77] Caviglia O P, Sadras V O. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Research*, 2001, 69: 259-266.
- [78] Sadras V. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Research*, 2002, 77: 201-215.
- [79] Sadras V O. Yield and water-use efficiency of water- and nitrogen-stressed wheat crops increase with degree of co-limitation. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21: 455-464.
- [80] Kirda C, Topcu S, Kaman H, Ulger A C, Yazici A, Cetin M, Deric M R. Grain yield response and N-fertiliser recovery of maize under deficit irrigation. *Field Crops Research*, 2005, 93: 132-141.
- [81] Kibe A M, Singh S, Kalra N. Water-nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions. *Agricultural Water*

- Management, 2006, 84: 221-228.
- [82] Abril A, Baleani D, Casado-Murillo N, Noe L. Effect of wheat crop fertilization on nitrogen dynamics and balance in the Humid Pampas, Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 119: 171-176.
- [83] Banedjschafie S, Bastani S, Widmoser P, Mengel K. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28: 1-7.
- [84] Paolo E D, Rinaldi M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 2008, 105: 202-210.
- [85] Kim K, Clay D E, Carlson C G, Clay S A, Trooien T. Do synergistic relationships between nitrogen and water influence the ability of corn to use nitrogen derived from fertilizer and soil? *Agronomy Journal*, 2008, 100: 551-556.
- [86] Nangia V, Turrall H, Molden D. Increasing water productivity with improved N fertilizer management. *Irrigation and Drainage Systems*, 2008, 22: 193-207.
- [87] Kobayashi K. A very simple model of crop growth: derivation and application. *International Rice Research Notes*, 1994, 19(3): 50-51.
- [88] Pirmoradian N, Sepaskhah A R. A very simple model for yield prediction of rice under different water and nitrogen applications. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(1): 25-34.
- [89] Timsina J, Humphreys E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat system. *Agricultural Systems*, 2006, 90, 5-31.
- [90] Arora V K, Singh H, Singh B. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid subtropical environment using the CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management*, 2007, 94: 22-30.
- [91] Behera S K, Panda R K. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling *Agricultural Water Management*, 2009, 96: 1532-1540.
- [92] Ritchie J T, Alagarswamy G. Model concepts to express genetic differences in maize yield components. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 4-9.
- [93] Ritchie J T, Basso B. Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: The role of agronomic management. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28: 273-281.
- [94] Thornton P K, Wilkens P W, Hoogenboom G, Jones J W. Sequence analysis//Tsuiji G Y, Uehara G, Balas S, eds. DSSAT v 3. Vol. 3-2. University of Hawaii, Honolulu, 1994.
- [95] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Bachelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18: 235-265.
- [96] Sarkar R, Kar S. Sequence analysis of DSSAT to select optimum strategy of crop residue and nitrogen for sustainable rice-wheat rotation. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 87-97.
- [97] DeCoursey D, Ahuja L, Hanson J, Shaffer M, Nash R, Hebson C, Rojas K. Root Zone Water Quality Model: version 1.0: technical documentation. USDA-ARS, GPSR Technical Report No. 2., Great Plains Systems Research Unit, Ft. Collins, Colorado, 1992.
- [98] Ma L, Malone R W, Heilman P, Karlen D L, Kanwar R S, Cambardella C A, Saseendran S A, Ahuja L R. RZWQM simulation of long-term crop production, water and nitrogen balances in Northeast Iowa. *Geoderma*, 2007, 140: 247-259.
- [99] Cameira M R, Fernando R M, Ahuja L R, Ma L. Using RZWQM to simulate the fate of nitrogen in field soil-crop environment in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 2007, 90: 121-136.
- [100] Li Y, White R, Chen D L, Zhang J B, Li B, Zhang Y M, Huang Y F, Edis R. A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain. *Ecological Modeling*, 2007, 203: 395-423.
- [101] McCown R L, Hammer G L, Hargreaves J N G, Holzworth D P, Freebairn D M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50(3), 255-271.
- [102] Moeller C, Asseng S, Berger J, Milroy S P. Plant available soil water at sowing in Mediterranean environments-Is it a useful criterion to aid nitrogen fertiliser and sowing decisions? *Field Crops Research*, 2009, 114: 127-136.
- [103] Akponikpè P B I, Gérard B, Michels K, Bielders C. Use of the APSIM model in long term simulation to support decision making regarding nitrogen management for pearl millet in the Sahel. *European Journal of Agronomy*, 2010, 32: 144-154.
- [104] Rahn C R, Zhang K, Lillywhite R, Ramos C, Doltra J, de Paz J M, Riley H, Fink M, Nendel C, Thorup-Kristensen K, Piro F, Venecia A, Firth C, Schmutz U, Rayns F, Strohmeyer K. Using the EU-Rotate_N model to forecast the effects of nitrate legislation on the economic output and environmental benefits in crop rotations//De Neve S, Salomez J, van den Bossche A, Haneklaus S, van Cleemput O, Hofman G, Schnug E, eds. Mineral Versus Organic Fertilization-Conflict or Synergism? International Scientific Centre of Fertilizers, Braunschweig, Budapest, Vienna, 2007: 433-439.
- [105] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M Th. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0. IGWMCPTS-53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of

- Mines, Golden, Colorado, 1999: 1-251.
- [106] Simunek J, van Genuchten M T, Sejna M. The HYDRUS software package for simulating the two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Technical manual. PC Progress, Prague, Czech Rep, 2006: 1-213.
- [107] Doltra J, Muñoz P. Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 277-285.
- [108] Lenz-Wiedemann V I S, Klar C W, Schneider K. Development and test of a crop growth model for application within a Global Change decision support system. *Ecological Modelling*, 2010, 221: 314-329.
- [109] Zhang K, Yang D, Greenwood D J, Rahn C R, Thorup-Kristensen K. Development and critical evaluation of a generic 2-D agro-hydrological model (SMCR N) for the responses of crop yield and nitrogen composition to nitrogen fertilizer. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 132, 160-172.
- [110] Zhang K F. Evaluation of a generic agro-hydrological model for water and nitrogen dynamics (SMCR_N) in the soil-wheat system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137: 202-212.
- [111] Zhang K F, Greenwood D J, Spracklen W P, Rahn C R, Hammond J P, White P J, Burns I G. A universal agro-hydrological model for water and nitrogen cycles in the soil-crop system SMCR N: Critical update and further validation. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (10): 1411-1422.
- [112] National Bureau of Statistics of China, 1989—2007. *China Statistical Yearbook 1989—2008*. Beijing: China Statistics Press, 1989-2008.
- [113] Yang X, Yan J P. Effect of climate warming on agriculture in the North China Plain. *Journal of Further Education of Shaanxi Normal University*, 2000, 17(4): 111-114.
- [114] Fei Y H, Zhang Z J, Zhang F E, Chen J S, Chen Z Y, Wang Z. Factors affecting dynamic variation of groundwater level in North China Plain. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(5): 538-541.
- [115] Wang X B, Dai K, Wang Y, Zhang X M, Zhao Q S, Wu X P, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O. Nutrient management adaptation for dryland maize yields and water use efficiency to long-term rainfall variability in China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (9): 1344-1350.
- [116] Fan X L. Research and development of controlled-release fertilizers as high efficient nutrient management materials in China. UC Davis: The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/0dt1q84f>. 2009.
- [117] Zhao B, Dong S T, Wang K J, Zhang J W, Liu P. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2678-84.
- [118] Wang X B, Xin J F, Grant C A, Bailey L D. Effects of placement of urea with a urease inhibitor on seedling emergence, N uptake and dry matter yield of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 1995, 75: 449-452.
- [119] Wang X B, Xin J F, Grant C A, Bailey L D. Effects of urease with nBPT on N uptake of spring wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(3): 6-10.
- [120] Zaman M, Saggat S, Blennerhassett J D, Singh J. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1270-1280.
- [121] Wang X B, Cai D X. Research and application of soil conditioner in agriculture. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 457-463.
- [122] Ju X T, Zhang F S, Bao X M, Romheld V, Roelcke M. Utilization and management of organic wastes in Chinese agriculture: Past, present and perspectives. *Science in China Series C-Life Sciences*, 2005, 48: 965-979.
- [123] Chen R R, Zhou Z G, Cao W X, Zhu Y, Dai T B. Designing and implementation of a decision supporting system for precision fertilization (DSSPF). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 516-521.
- [124] Cao W X, Zhu Y, Tian Y C, Yao X, Liu X J. Research progress and prospect of digital farming techniques. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(2): 281-288.
- [125] Liu H B, Zhang Y G, Li Z H, Zhang C Y, Hu D Y. Application of Canopy Spectral Reflectance in Monitoring Nitrogen Status of Winter Wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1743-1748.
- [126] Jia L L, Shou L N, Li F, Chen X P, Zhang F S. Overview of remote sensing technology be used in plant nitrogen status diagnosis and N fertilizer recommendation. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 396-401.
- [127] Tilling A K, O'Leary G J, Ferwerda J G, Jones S D, Fitzgerald G J, Rodriguez D, Belford R. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Research*, 2007, 104: 77-85.
- [128] Solari F, Shanahan J, Ferguson R, Schepers J, Gitelson A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 571-579.
- [129] Verhulst N, Govaerts B, Sayre K D, Deckers J, François I M, Dendooven L. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of

agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant and Soil*, 2009, 317: 41-59.

- [130] Pimstein A, Eitel J U H, Long D S, Mufradi I, Karnieli A, Bonfil D J. A spectral index to monitor the head-emergence of wheat in semi-arid conditions. *Field Crops Research*, 2009, 111: 218-225.

参考文献:

- [1] 林葆. 化肥与无公害农业. 北京: 中国农业出版社, 2003: 1-8.
- [6] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [7] 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 养分资源综合管理与中国粮食安全. *资源科学*, 2008, 30(3): 415-422.
- [8] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 徐久飞, 石立委, 李俊良. 华北平原小麦施肥现状及影响小麦产量的因素分析. *华北农学报*, 2008, 23(增刊): 224-229.
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 马文奇. 中国养分资源可持续利用现状与对策. 2006 世界化肥农业大会. http://www.fertilizer.org/ifa/chinese_portal/PDF/C-2006_ag_kunming_zhang.pdf, 2006.
- [10] 王小彬, 高绪科. 旱地农田水肥相互作用的研究. *干旱地区农业研究*, 1993, 3: 6-12.
- [12] 沈荣开, 王康, 张瑜芳, 杨路华, 穆金元, 赵立新. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 35-38.
- [13] 巫东堂, 李红梅, 焦晓燕, 周怀平. 旱地麦田水肥关系及对产量的影响试验研究. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 39-42.
- [14] 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术研究. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1995.
- [15] 武继承, 朱洪勋, 杨占平. 不同水肥条件下旱地小麦水肥利用率研究. *华北农学报*, 2003, 18(4): 95-98.
- [16] 詹其厚, 陈杰. 水肥配合对玉米产量及其利用效率的影响. *土壤肥料*, 2005(4): 14-18.
- [17] 张中一, 施正香, 周清. 农用化学品对生态环境和人类健康的影响及其对策. *中国农业大学学报*, 2003, 8(2): 73-77.
- [18] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 张林秀. 我国农业面源污染的控制政策和措施. *科技导报*, 2005, 23(4): 47-51.
- [21] 中华人民共和国国家统计局编. 中国统计年鉴-2008. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [22] 张玉铭, 胡春胜, 毛任钊, 董文旭. 华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1863-1867.
- [23] 胡春胜, 程一松, 于贵瑞. 华北平原施氮对农田土壤溶液中硝态氮含量的影响. *资源科学*, 2001, 223(6): 46-48.
- [24] 王小彬, 高绪科. 土壤水分胁迫与施肥效果. *土壤肥料*, 1988, 4: 22-26.
- [25] 王小彬, 高绪科. 北京地区旱地农田水分状况和施肥对作物产量的影响 // 中国农业科学优秀论文集, 第二集 (1987—1988). 1989: 71-78.
- [26] 王小彬, 高绪科. 关于旱地土壤中的水肥问题. *山西农业科学*, 1991, 8: 33-36.
- [27] 王小彬, 蔡典雄, 高绪科. 土壤水肥条件与作物养分吸收的关系 // 旱地农田肥水关系原理与调控技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 161-165.
- [28] 孟兆江, 荆建军, 孙笑梅. 冬小麦-夏玉米节水高效吨粮水肥耦合及其配套技术. *河南农业科学*, 1997, 6: 4-7.
- [29] 穆兴民. 水肥耦合效应与协同管理. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [30] 邢维芹, 王林权, 骆永明, 李立平, 李生秀. 半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应研究. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 46-49.
- [31] 马强, 宇万太, 沈善敏, 张璐, 周桦. 下辽河平原水肥交互作用及对玉米产量的影响. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 29-33.
- [32] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 46-50.
- [34] 薛利红, 罗卫红, 曹卫星, 田永超. 作物水分和氮素光谱诊断研究进展. *遥感学报*, 2003, 7(1): 73-80.
- [35] 赵春江, 黄文江, 王之杰, 王北洪, 王纪华. 不同水肥处理下冬小麦冠层含水率与温度关系的研究. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 25-28.
- [36] 李志勇, 郭永新, 王璞, 翟志席, Marion B Z. 几种水氮模式处理下冬小麦冠层结构的差异. *麦类作物学报*, 2007, 27(6): 1085-1088.
- [37] 杨传福, 孟兆江. 冬小麦水肥时量关系研究. *农田水利与小水电*, 1992, 3: 9-11.
- [38] 李自珍, 赵松岭. 半干旱区农田水肥调控试验与作物生长模型. *草业学报*, 1994, 3(1): 7-12.
- [39] 周军, 黄德明, 徐秋明, 杨荣泉, 陈海军. 冬小麦水肥机理试验研究. *农业工程学报*, 1994, 10(1): 44-49.
- [40] 孟兆江, 刘安能, 吴海卿, 杨传福, 贾大林, 司徒淞. 黄淮豫东平原冬小麦节水高产水肥耦合数学模型研究. *农业工程学报*, 1998, 14(1): 86-90.
- [41] 孟兆江, 刘安能, 王和洲, 庞鸿宾, 贾大林. 冬小麦-夏玉米一年二作制节水高产水肥耦合数学模型研究. *中国农村水利水电*, 1999, 11: 15.
- [42] 赵国强, 朱自玺, 邓天宏, 方文松, 侯建新. 水分和氮肥对冬小麦产量的影响及其调控技术. *应用气象学报*, 1999, (3): 314-320.
- [43] 李红, 周连第, 张有山. 京郊平原区粮田土壤水肥调控模型的建立. *中国农村水利水电*, 2002, 1: 43-44.

- [44] 刘文兆,李玉山,李生秀. 作物水肥优化耦合区域的图形表达及其特征. 农业工程学报,2002,18(6): 1-3.
- [45] 刘文兆,李玉山. 渭北旱塬西部作物水肥产量耦合效应研究. 水土保持研究,2003,10(1): 12-15.
- [46] 黄元仿,李韵珠,李保国,陈德立. 区域农田土壤水和氮素行为的模拟. 水利学报,2001,11: 87-92.
- [47] 高如泰,陈焕伟,李保国,黄元仿. 黄淮海平原冬小麦生长期土壤水氮利用效率模拟分析. 中国农业科学,2006,39(3): 552-562.
- [48] 陈研,胡克林,冯凌,李保国. 基于土壤-作物系统模拟模型的冬小麦田间水氮优化管理. 农业工程学报,2007,23(6): 55-60.
- [49] 胡克林,李保国,陈研,郭永强. 作物生长与土壤水氮运移联合模拟的研究 I-模型. 水利学报,2007,38(7): 779-785.
- [50] 金梁,胡克林,李保国,龚元石. 作物生长与土壤水氮运移联合模拟的研究 II-模型验证与应用. 水利学报,2007,38(8): 972-979.
- [51] 郝西,董中东,李艳,崔党群. 不同水氮环境条件下小麦氮素含量和氮素利用效率的遗传模型研究. 麦类作物学报,2006,26(4): 103-106.
- [52] 贾树龙,孟春香,唐玉霞,刘春田. 麦田生态系统中的水肥时空关系与调控途径. 生态农业研究,1995a,3(3): 62-66.
- [53] 贾树龙,孟春香,唐玉霞,刘春田. 水分胁迫条件下小麦的产量反应及对养分的吸收特征. 土壤通报,1995b,26(1): 6-8.
- [54] 唐玉霞,孟春香,贾树龙,刘春田. 冬小麦对水肥的反应差异与节水冬施肥技术. 干旱地区农业研究,1996,14(2): 36-40.
- [55] 李世娟,周殿玺,李建民. 限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响. 华北农学报,2001,16(3): 86-91.
- [56] 李世娟,周殿玺,诸叶平,李建民,兰林旺. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配. 华北农学报,2002,17(1): 69-75.
- [57] 李志勇,王璞. 优化水肥及传统水肥对冬小麦根系生长及水氮利用效率的影响. 河南农业科学,2003,9: 42-45.
- [58] 李志勇,陈建军,王璞. 不同水氮优化组合模式对冬小麦产量形成及水氮资源利用效率的影响. 华北农学报,2005,20(2): 42-45.
- [59] 王晓英,贺明荣,刘永环,张洪华,李飞,华芳霞,孟淑华. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响. 生态学报,2008,28(2): 685-694.
- [60] 潘家荣,巨晓棠,刘学军,陈新平,张福锁,毛达如. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向. 核农学报,2009,23(2): 334-307.
- [61] 李永宾,郑丽敏,廖树华,朱虹,刘洪见. 北京郊区不同水氮管理模式对冬小麦产量及水分和养分利用效率的影响. 麦类作物学报,2005,25(2): 51-56.
- [62] 赵久然,郭强,郭景伦,尉德铭,王长武,刘友,凌昆. 北京郊区粮田化肥投入和产量现状的调查分析. 北京农业科学,1997,15(2): 36-38.
- [63] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究. 中国农业科学,2002,35(11): 1361-1368.
- [64] 周凌云. 土壤水分条件对氮肥利用率影响的研究. 核农学报,1996,10(1): 43-46.
- [65] 曾希柏,李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响. 中国农业科学,2004,37(3): 387-392.
- [66] 王晓凤,吴文良,潘志勇,陈淑峰,刘光栋,夏训峰. 不同水氮处理对冬小麦生长及土壤水分利用效率的影响. 农业环境科学学报,2007,26(增刊): 741-745.
- [112] 中华人民共和国国家统计局编. 中国统计年鉴-1989—2008. 北京:中国统计出版社,1989-2008.
- [113] 杨新,延军平. 华北平原气候变暖的农业效应. 陕西师范大学继续教育学报,2000,17(4): 111-114.
- [114] 费宇红,张兆吉,张凤娥,陈京生,陈宗宇,王昭. 华北平原地下水位动态变化影响因素分析. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(5): 538-541.
- [117] 赵斌,董树亭,王空军,张吉旺,刘鹏. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响. 应用生态学报,2009,20(11): 2678-2684.
- [119] 王小彬,辛景峰,Grant C A, Bailey L B. 尿素施法与 nBPT 配用对春小麦植株 N 吸收的影响. 干旱地区农业研究,1998,16(3): 6-10.
- [121] 王小彬,蔡典雄. 土壤调理剂 PAM 的农用研究和应用. 植物营养与肥料学报,2000,6(4): 457-463.
- [123] 陈蓉蓉,周治国,曹卫星,朱艳,戴廷波. 农田精确施肥决策支持系统的设计与实现. 中国农业科学,2004,37: 516-521.
- [124] 曹卫星,朱艳,田永超,姚霞,刘小军. 数字农作技术研究的若干进展与发展方向. 中国农业科学,2006,39(2): 281-288.
- [125] 刘宏斌,张云贵,李志宏,张彩月,胡德永. 光谱技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用研究. 中国农业科学,2004,37(11): 1743-1748.
- [126] 贾良良,寿丽娜,李斐,陈新平,张福锁. 遥感技术在植物氮营养诊断和推荐施肥中的应用之研究进展. 中国农学通报,2007,23(12): 396-401.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元