

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 2012

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



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期 2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响·····	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价·····	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征·····	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟·····	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应·····	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应·····	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素·····	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应·····	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程·····	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系·····	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状·····	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征·····	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响·····	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅·····	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应·····	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局·····	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较·····	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性·····	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响·····	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境·····	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系·····	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性·····	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局·····	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立·····	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较·····	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表·····	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响·····	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别·····	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO ₂ 通量的季节特征·····	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例·····	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
专论与综述		
湿地退化研究进展·····	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评·····	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
问题讨论		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性·····	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响·····	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
研究简报		
祁连山典型灌丛降雨截留特征·····	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法·····	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新的鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012311881

杨荣, 苏永中, 王雪峰. 绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评. 生态学报, 2012, 32(4): 1308-1317.

Yang R, Su Y Z, Wang X F. A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1308-1317.

绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评

杨 荣, 苏永中*, 王雪峰

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000)

摘要:作物对氮素的吸收利用及氮素在土壤中的积累和运移, 制约着绿洲农田生产力并对农田环境造成影响, 是绿洲农田生态系统可持续发展和绿洲稳定性研究的一个重要方面。针对农田氮素积累和淋溶这一绿洲资源消耗量增加、耕作方式粗放结果下的环境问题, 对其特征及引发的环境效应进行了详细阐述, 并从不同的角度综述了缓减绿洲氮素淋失及环境污染的对策。指出在未来还需加强绿洲地下水氮污染调查及农田氮素积累和淋溶现状的区域评价, 并针对一些在绿洲大面积推广的农田管理技术开展其对农田氮素积累和淋溶影响的研究, 并强调人文因素在绿洲农田氮素积累与淋溶调控中的重要性。

关键词:绿洲; 农田; 氮素积累; 硝态氮淋溶

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis

YANG Rong, SU Yongzhong*, WANG Xuefeng

Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Nitrogen was an essential element for plant growth and the application of nitrogen fertilizers was one of the main contributors to the increased agricultural production in the world. However, many environment problems were also induced by the excessive use of nitrogen fertilizer. In China, ground- and surface-water contamination caused by field nitrogen accumulation and leaching has become more and more serious in most major grain production regions. Recently, with the development of intensive agriculture with high resource input, many environmental pollution problems caused by excessive use of nitrogen fertilizer such as groundwater contamination have appeared and more and more serious in oasis, northwest China. The issue that nitrogen accumulation and leaching in oasis agro-ecosystems has been received much attention in recent years. The solution of this problem could decrease waste of resources and improve ecological condition of oasis, and it was also important to sustainable agriculture and oasis stability. In this review, we introduce the advances about nitrate accumulation and leaching that have been carried out in oasis agro-ecosystems. First of all, some research methods about nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis were present, and quantity feature and influencing factors in some regions and oases were also summarized. In field ecosystem of oasis, both nitrogen uptake by crops and soil drainage volume determine the amount of nitrogen accumulation and leaching. Fertilization and irrigation management including the adoption of application rates and time, kind of fertilizer, and fertilization and irrigation techniques et, al were the principal factors to effect soil nitrogen accumulation and leaching in the field of oasis. Also, cropping system including chosen of variety and rotation, cultivation and tillage system, plastic film and straw mulching in local region have important effect on

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421302);国家自然科学基金项目(41071199);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才成长基金(51Y084881)

收稿日期:2010-12-31; 修订日期:2011-06-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suyzh@lzb.ac.cn

nitrogen accumulation and transportation in soil. Some simulations and models were also been developed and applied to estimate regional status of nitrogen accumulation and leaching in oasis agro ecosystems.

There were some suggestion to reducing nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis. Firstly, enhancing the nitrogen fertilizer use efficiency through improved filed management was preferential consideration to control exceed nitrogen accumulation and leaching from filed. Secondly, it is also important to develop and improve the soil and plant nutrient monitor techniques, which can offer fertilization criterion for local agricultural practice. Finally, with respect of regional estimation in nitrogen, improving precision and accuracy of nitrogen accumulation and leaching simulation is crucial, but such study are still deficiency. In the future, the world must produce more food to feed the growing population than ever before, and more intensive agriculture management and nitrogen input will lead to more environmental pollution problems, and many problems are still required to taken into account. It was point out that investigation of groundwater nitrate contamination and regional estimation of field nitrogen accumulation and leaching statue are primary work in agro-ecosystems of oasis. Researches concerning the nitrogen accumulation and leaching under the current agricultural management practices and cultivation patterns in the oasis agro-ecosystem should be strengthened, and the human element should be emphasized.

Key Words: oasis; farmland; nitrogen accumulation; nitrate leaching

氮淋溶所引起的环境问题越来越受到广泛的关注。早在 20 世纪 80—90 年代,一些发达国家已开始通过限定氮的施用量来控制地下水氮污染问题^[1]。中国是氮肥施用量较高的国家,2002 平均氮肥施用量为美国的 2.28 倍、澳大利亚的 8.85 倍,一些地区年均施氮量已超过 600 kg/hm²,其中约有 30%—50% 通过淋溶进入地下水,地下水污染等环境问题较为突出^[2]。目前,中国农田过量使用化肥导致的地表水富营养化、地下水硝酸盐富集等问题已经影响到社会经济发展和人体健康^[3],因此,寻求农田生态系统生产力、资源利用效率和环境质量协同提高的农业管理对策成为了维持我国生态环境健康和农业可持续发展亟待解决的问题。

基于对环境问题的关注,近年来对区域氮平衡及施用氮肥对地下水污染风险的评价成为我国农业与环境研究的热点。在降雨量稀少,农业生产主要以引水灌溉为依托的荒漠绿洲农业区,土壤氮素积累及淋溶引起的地下水氮污染问题也逐步受到人们的关注,近年来开展了大量相关研究,为维持绿洲农田环境的健康稳定提供了科学依据,对绿洲农业可持续发展和节水型绿洲建设也具有重要的现实意义。

1 农田生态系统氮素积累和淋溶特征

1.1 农田氮素积累和淋溶的研究方法

近 20 a 来,农田土壤氮积累和淋溶特征及对地下水污染的环境效应、以及减少氮淋溶损失的调控途径和对策等,已有大量的研究报道。研究方法从微区尺度的 Lysimeter 研究(或土柱法)、¹⁵N 示踪、溴化物示踪等,到田间小区试验、综合性的区域田间调查,以及各种模拟模型方法的应用等。研究内容涉及灌溉体系、施肥管理(方法、肥料种类、施肥时间等)、作物类型和轮作方式、耕作管理、冬季覆盖作物、土地利用类型和管理方式、土壤类型、硝化抑制剂使用等对土壤氮素积累和淋溶的影响等各个方面^[4-5],这些方法在阐明土壤氮素积累和淋溶规律以及计算不同的土壤、气候及农田管理方式下土壤氮素积累和淋溶量时,都有一定的应用价值,尤其随机性模型的应用,将环境属性的空间变异性作为对土壤氮素积累和淋溶的影响因素进行考虑,提高了区域土壤氮素积累和淋失评价准确性。

1.2 国内外及荒漠绿洲农田生态系统氮素积累和淋溶的数量特征

英国和欧盟成员国自 1990 年开始先后在自己的管理领域划定“硝态氮敏感区”(NSA)和“硝态氮脆弱区”(NVZ),开始重视农田土壤氮素积累和淋溶问题^[1]。一些专家和学者通过研究和分析,从宏观上测算了农田土壤氮素淋失的数量,如 Holger 等^[6]研究表明,丹麦每年约有 4.3×10⁴ t 的硝态氮从农田土壤淋溶至地下水、河流和湖泊中;Addiscott^[7]研究表明,英国春小麦农田施氮量的 10%—25% 的通过淋溶损失。

我国自 1979 年以后,农田氮素开始盈余,并呈逐年上涨趋势,1998 年农田氮素盈余量达 585 万 t^[8]。近年来的研究调查表明,我国大部分地区土壤氮素积累量过高,淋失威胁较严峻,一些地区 2—4 m 土层硝态氮积累量高达 1812 kg/hm²^[2]。

在干旱绿洲区,一方面,由于受降雨量的限制,农业生产主要依赖灌溉水,在此基础上形成了有别于其它区域的农业管理方式。另一方面,由于干旱绿洲区所处的特殊地理位置和环境条件,受周围荒漠区域的影响,水热条件和土壤特性等因素的差异均影响其农田氮素循环和平衡过程^[9],因此其土壤氮素积累和淋溶特征也有别于其它区域。近年来在绿洲不同区域相继开展了一些氮素积累和淋溶特征的研究,如在石羊河流域绿洲,施氮量 400 kg/hm² 条件下,0—100 cm 土层硝态氮积累量达 60 kg/hm²,淋失量达 46 kg/hm²^[10];在甘肃张掖绿洲,0—180 cm 土层硝态氮积累量达 10—325 kg/hm²,氮损失量达 21.5—64.5 kg/hm²^[11];在内蒙古西部阿拉善绿洲,传统农田管理方式下,土壤氮素淋失量达 271 kg/hm²^[12];在内蒙古河套绿洲,传统的耕作制度和秋灌定额下每年可损失氮素约 2.6×10^7 kg^[13];在新疆新和绿洲,菜田 0—280 cm 土层,硝态氮积累量达 588 kg/hm²^[14]。

与绿洲内部相比较,边缘绿洲区域降雨量更加稀少,农业生产对灌溉水的依赖性更强。由于地处绿洲和荒漠的交错带,较多的区域土壤为肥力低下持水能力较弱的砂质土壤,其高渗透性、低持水能力更容易导致土壤氮素随水移动而流失^[15],氮的淋溶风险更大。近年来,国内外对边缘绿洲砂质土壤氮素积累和淋溶特征进行了一些研究,如 Simmelsgaard^[16]通过建立的经验公式计算出在平均施氮量 168 kg hm⁻² a⁻¹,土壤粘粒含量在 5%、12% 和 20% 时,氮的淋溶损失量分别为 68、44、26 kg hm⁻² a⁻¹;毕经纬等^[17]的模拟分析结果表明,全耕作年风沙土的硝态氮淋失量为 108.0 kg/hm²,占总输入氮量的 25.3%。

1.3 农田管理对绿洲土壤氮素积累和淋溶的影响

对绿洲土壤氮素积累和淋溶有重要影响的农田管理措施包括:氮肥和灌溉水用量、肥料配施和种植制度的选择。

1.3.1 氮肥和灌溉

氮肥的过量施用是造成绿洲农田土壤氮素积累和淋溶的主要原因,氮肥施用超过作物获得最大产量所需氮量时,盈余的氮素会在土壤中积累^[8]。但引起氮素积累和淋溶的临界施氮量存在区域差异,如在山东省禹城地区,施氮量超过 300 kg/hm²,土壤中硝态氮积累量显著增加^[4];而在甘肃河西张掖绿洲,施氮量超过 225 kg/hm²,会引起土壤氮素积累和淋溶的显著增加^[18];在新疆尉犁绿洲,棉田施氮量从 225 kg/hm² 增加到 375 kg/hm² 时,硝态氮积累峰从 40 cm 推移至 60 cm^[19]。

由过量施氮导致盈余的氮素在土壤中的运动和迁移与土壤水分状况密切相关^[1]。在雨养农田,降水量的年际间变化是影响农田土壤氮素淋失的重要因素^[20];而在干旱荒漠绿洲农业区,农田灌溉则是土壤氮素淋失的主要驱动因子^[21]。灌溉量对绿洲农田土壤氮素淋失有最直接的影响,如在内蒙古阿拉善左旗绿洲,在灌溉量 825 mm 施氮量 300 kg/hm² 的当地传统农田管理方式下,58% 的施入氮被淋溶至 1.8 m 土层以下,通过水氮供应优化,将灌溉量减少到 600 mm,施肥量减少到 75 kg/hm²,可使氮淋溶量减少到 14 kg/hm²^[21]。一次性灌溉量较大的灌溉方式(如秋冬灌溉)也容易导致绿洲农田土壤硝态氮向深层淋溶^[22],如在内蒙古河套绿洲,通过秋季灌溉每年损失的氮素达当年施氮量的 20.3%^[23]。在灌溉过程中的不同时段进行氮肥施用会影响作物氮肥吸收利用进而影响土壤氮素的积累和淋溶^[21]。灌溉技术的选择也会影响土壤氮素累积与淋溶,如在新疆绿洲的研究表明,与传统的漫灌技术相比滴灌技术可显著降低土壤硝态氮含量^[19],并显著减少土壤氮素深层积累^[24]。

1.3.2 肥料配施

氮肥与其它肥料配合施用,可以显著影响绿洲农田土壤中氮素的积累。16 a 连续配施氮磷钾肥使硝态氮的深层积累量较单施氮肥降低 30% 左右^[25];郭胜利等^[26]在半干旱区荒漠绿洲的研究表明,与长期单施氮肥相比,氮磷肥配施使得作物的氮肥利用效率由 18% 提高到 36%,土壤剖面中的硝态氮积累量由 1000 kg/hm²

下降至 254.5 kg/hm²。

长期有机无机肥配合施用可显著增加绿洲农田土壤生产力,维持和提高土壤质量,但有机肥过高易导致土壤剖面中硝态氮的积累^[11],适量有机无机肥配合施用,能有效提高作物氮素利用效率,减少绿洲农田土壤氮素淋失^[11],但由于受土壤环境和作物吸收的影响,仍需要大量针对不同区域的定位试验结论以确定有机无机肥的具体配量。

1.3.3 种植制度

一个地区的种植制度包括生产过程中的土壤耕作、覆盖方式、轮作以及作物类型的选择等农田管理措施。耕作方式对绿洲农田土壤的渗透性、持水能力、团粒结构、有机质含量等理化特性产生影响,进而影响土壤氮素积累和淋溶。如少耕减少对土壤表层的疏松,可以降低表层土壤的渗透性,增加其持水肥能力,有利于减少硝态氮向土壤深层的淋溶^[27],在河西临泽绿洲,传统三耕两耨的土壤耕作方式下作物收获后 0—40 cm 土层硝态氮的积累量比少耕处理低 8.5%—22.6%^[28],表明少耕比多次翻耕更有利于将硝态氮保持在土壤表层,但是否能够减少其向深层淋溶仍需进一步研究。不同的地面覆盖方式改变土壤水热条件及碳氮含量,影响氮素在土壤中的积累和运移,卜玉山等^[29]的研究表明,秸秆覆盖增加土壤有机质和氮含量,但耕层土壤(0—20cm)硝态氮积累量则表现出地膜覆盖>秸秆覆盖>无覆盖处理^[30];由于干旱荒漠绿洲区日照、积温以及降雨等条件较为独特,可能对秸秆降解及土壤硝化过程产生影响导致硝态氮积累和淋溶表现出不同规律,如临泽绿洲的一项研究表明,作物收获后覆膜处理 0—40 cm 土层土壤硝态氮积累量比覆麦秆处理低 7.0%—8.8%^[28],但该试验仅开展了 1a,且没有进行表现机制方面的研究,这方面的研究在干旱绿洲区也较少。与单作相比,作物间作能够降低绿洲农田土壤硝态氮在剖面的积累^[10]。不同作物之间的轮作尤其浅根与深根作物轮作之后,深根植物能够吸收不能被浅根植物吸收利用的深层吸附的硝态氮,从而显著降低硝态氮的深层积累^[20]。在小麦-休闲的种植体系中,休闲期种植覆盖作物也可显著降低硝态氮的淋失和积累量^[31]。

由于农田管理和肥料投入的差异,作物类型的选择对土壤硝态氮积累和淋溶有很大的影响。由于较高的农业集中度和氮肥施用量,大多数区域都出现菜田硝态氮积累量过高的现象^[32],如北京平原地区 0—400 cm 土层土壤硝态氮积累量为 1230 kg/hm²^[32]。近年来为追求较高的经济效益,绿洲农区蔬菜种植中的氮肥投入量呈增加趋势,也造成硝态氮在土壤中的大量积累。如在黑河中游绿洲^[22],大棚蔬菜地 0—300 cm 土层硝态氮积累量平均值高达 2171.45 kg/hm²,相当于小麦-玉米轮作田的 9.80 倍,番茄地的 6.51 倍;在新疆新和绿洲 0—280 cm 土层硝态氮积累量也高达 1390 kg/hm²^[14],对区域水环境造成很大的威胁。相比较而言,活跃生长期较长的植物能较多地吸收土壤氮素,绿洲农田种植枣树园和苜蓿地土层硝态氮积累量远低于大棚蔬菜地^[22]。

1.4 氮素淋溶模型及其在绿洲农田研究中的应用

根据构成原理,土壤氮素积累和淋失模型可分为 3 类:确定性机理模型、确定性函数模型和随机模型。

对流-扩散模型是经典的溶质运移机理性模型,是诸多溶质运移转化模型的主体构成,如 LEACHM、RZWQM、HYDRUS-1D 等^[33]。常见的确定性函数模型有活塞流、半解析模型、分层平衡模型等,其中分层平衡模型简单易算,模拟结果相对较准确,是目前水肥管理研究中比较实用的工具^[34]。

考虑到田间土壤的空间和时间变异性,最有效的描述田间条件下溶质迁移变异的模型是随机模型。随机模型有两种基本形式,一是在确定性模型中引入随机参数,二是完全随机模型。第一种形式如胡克林等^[35]将简化土壤水氮联合运移模型与条件模拟方法所得到的表层土壤饱和导水率(K_s)的随机场相结合,随机地模拟了冬小麦地硝酸盐淋失情况;马军花和任理^[36]考虑土壤有机氮矿化速率的空间变异性运用模型对农田尺度土壤氮素转化和硝态氮淋失规律进行了数值分析。完全随机模型是在当制约溶质迁移的机理不清楚时,将某一时刻从给定土壤容积输出的溶质质量速率看作前一时刻输入的随机函数,完全随机模型的运用例子如任理和马军花^[37]应用传递函数模型(TFM)模拟了冬小麦生长条件下土壤硝态氮的淋失。

土壤氮素运移模型与地理信息系统(GIS)结合以研究区域尺度下的土壤氮素运移,可将土壤氮素运移的

研究工作从室内、点位或田间扩展到区域,为解决土壤或环境中的实际问题提供了有利条件^[33]。然而,要将已有的 GIS 系统和氮素运移模型直接结合是非常困难的,目前国内这方面的研究较为缺乏。

模型在绿洲农田氮素淋失研究应用中的例子有:胡克林等^[38]在前人研究成果的基础上构建了土壤-作物系统农田水氮运移及作物生长联合模拟模型(SPWS),并将其成功运用于荒漠绿洲农田氮素淋溶研究中,其结果表明,在内蒙古阿拉善绿洲农田投入氮素的 32%—61% 通过淋溶损失^[12];Wei 等^[39]通过综合考虑作物生长、水氮循环与农田收益及政策调控等组分建立模型,根据模拟结果对绿洲氮素淋溶的减缓政策提供建议,在氮素积累和淋溶调控过程中充分考虑了社会因素,使模型结果更具有实际应用价值。

2 土壤氮素淋溶的环境效应

农田土壤氮素淋溶使氮肥利用率降低,不仅导致资源浪费,更引起水体污染等环境问题。

氮肥的当季利用率世界平均水平为 33%,我国稻麦的 N 肥的当季利用率平均为 30%—41%^[20]。19 世纪 60 年代到 1980 年间,由于氮肥的过量施用,北美氮肥效率从 72 kg 各粒/(kg N)降至 42 kg 各粒/(kg N)^[40],在我国,氮肥的利用率从 1994 年的 34.7% 下降到 1999 年的 34%^[41]。

氮素利用效率的降低必然导致氮素的无效损耗增加,造成资源的浪费。研究表明,在亚洲人为投入农田生态系统的氮素中,通过气体挥发、硝态氮淋溶等途径输出的氮素中,超过 90% (-22 Tg N a^{-1} , 占农田生态系统氮投入的 36%) 疏散至环境中不能被农田生态系统再利用^[42]。

农田生态系统中淋失的氮素一部分进入水体,对人体和动物健康以及环境造成极大的危害^[2]。早在 100 多年前,发现两种致命疾病“蓝婴综合症”和“胃癌”的发病与饮用水硝态氮含量超标有关系的时候,人们逐渐意识到,地下水硝态氮的污染已对人类健康构成致命的威胁。20 世纪 60 年代,欧美等许多国家开始关注地下水硝态氮污染问题,世界卫生组织(WHO)和欧美各国限定饮用水中硝态氮的含量(10 mg/L 或 11.3 mg/L),从随后的 20 世纪 80 年代开始,欧美、日本等^[43-44] 发达国家都先后通过大量的水质调查与检测控制对所在区域的地下水硝态氮污染状况进行了调查研究。近年来的调查显示,在我国农业集约化程度较高、化肥投入量较高的地区地下水硝态氮含量超标的现象已比较普遍^[32,45-46],一些地区地下水硝态氮的超标率甚至高达 72.5%^[46] 和 80.5%^[32]。

在荒漠绿洲农区,地下水为主要的饮用水源,因而其硝态氮含量过高对人体健康造成的危害更加严重。而绿洲一些区域地下水硝态氮污染近况令人堪忧,我国北方 14 个县市地下水、饮用水的普查结果表明,49% 的浅层地下水硝酸盐含量超过饮用水标准,部分水样的硝态氮含量已达到 100—500 mg/L^[47];黑河中游绿洲一项调查研究表明,被调查水井的 32.4% 硝态氮含量超标^[48]。在相邻的绿洲区域,地下水硝态氮的污染状况也存在一定的差异,如黑河中游绿洲的调查中,临泽县地下水硝态氮含量超标率为 42.9%,而高台县和甘州区超标率为 25.0%^[48]。这种区域差异一方面是受经济发展水平条件制约的农业生产方式的影响,另一方面,调查水井的深度和分布等因素也决定了该区域地下水硝态氮污染状况的差异^[32]。如在黑河中游绿洲,深度低于 20 m 的水井硝态氮含量超标率高于深度超过 60 m 的水井;在农田附近水井采取的水样的硝态氮含量超标率高于居民区附近水井采取的水样^[48]。土壤质地同样对地下水硝态氮含量有很大影响,在黑河中游绿洲,沙土地区地下水硝态氮含量平均值是壤土地区的 2.74 倍,超标率沙土地区为 72.7%,壤土地区为 44.4%^[48]。

3 缓减氮素淋失及环境污染的对策和调控措施

减少氮素在土壤中的积累和淋溶对提高氮肥利用率、经济效益,减少由于氮肥的大量损失对环境造成的负效应有积极的作用。国外很早以前就已经开展了减少氮素积累和淋溶的途径和对策方面的研究。英国洛桑试验站于 1843 年设立长期试验,系统研究施肥对土壤硝态氮淋失及水环境质量的影响^[49],并基于这些研究提出了管理环境硝酸盐的政策及国家“农业和园艺施肥推荐”标准,使英国硝酸盐敏感区和危险区的硝酸盐淋失总量减少 20%。美国阿巴拉马农业试验站于 1896 年设立长期试验,将氮素管理对农田生态系统硝态氮淋溶和积累的影响作为研究重点之一^[49],并发展了许多提高氮肥利用效率,减少土壤硝态氮淋失的氮素管

理技术(包括分次不同深度施氮技术、花期叶面施肥、灌溉水管理、作物覆盖等)。美国加州大学、菲律宾国际水稻研究所、印度旁遮普农业大学都通过设立的长期定位试验为减缓氮素淋失及环境污染对策和调控措施提供理论依据^[49]。

归纳起来,关于减少土壤硝态氮积累和淋溶的调控途径和对策主要包括以下几点:

3.1 提高氮肥利用效率,改善绿洲农田管理措施

降低土壤氮素的淋溶最根本的途径在于提高氮肥利用效率,增加作物对土壤氮素的吸收转化。首先,可以通过优化施肥量的途径以提高作物的氮肥利用效率,减少氮素积累和淋失,如日本 Kagamigahara 市农民将胡萝卜氮肥用量从 1970 年的 256 kg/hm² 至 1991 年的 153 kg/hm²,从而使地下硝态氮浓度稳步降低^[43]。其次,在相同的施氮条件下,合理的氮肥运筹、施肥方式能有效减少土壤硝态氮积累,如玉米种植中基施+吐丝期追施氮硝态氮含量比基施+乳熟期追施氮土壤低 16%^[50];氮磷或氮磷钾配施时,根区和根区外土壤硝态氮降低 44.5%—76.5%^[51]。另外,通过适宜作物品种的选择,也可以提高作物氮肥利用效率,减少土壤硝态氮积累,如研究表明,选用与农作区气候与土壤条件相适宜的品种可使糯玉米产量提高 18%—29%,氮肥利用效率提高 35.1%—36.7%^[52]。

合理的灌溉水管理是减少土壤硝态氮淋溶的有效途径,包括适宜灌水量和现代灌溉技术的采用。应根据作物的水分需求确定合理的灌溉水量和适宜的灌水时期,以减少过量灌水对土壤氮素的淋洗。另外,降雨会导致灌溉水分超过预定供水量,因此,考虑降雨等气候因素选择灌溉时期会减少绿洲农田氮素积累和淋溶的风险。与传统大水漫灌的方式相比,现代灌溉技术的采用可以减少土壤水分运移的强度和速率,从而减少土壤硝态氮的淋溶,如喷灌^[53]、膜下滴灌^[24]技术在减少氮素淋移方面具有明显的优越性。

选择高吸氮的、根系长度与密度都比较高的作物和品种,进行合理轮作或间作,以及进行少免耕等耕作技术,也是降低绿洲农田氮素淋洗风险的重要农田管理措施^[54]。如在快速生长的深根植物田菁与玉米轮作的种植体系中,田菁可吸收利用对玉米则无效的深层吸附的硝态氮^[20]、玉米和小麦以及蚕豆间作^[10]及少耕等方式^[27]均可减少土壤氮素积累和淋失。

3.2 加强土壤和作物氮素速测技术的发展和运用,全面普及测土配方施肥工程

由于土壤氮素积累和淋溶以及地下水氮素污染研究方法过于繁琐和费时,严重制约了农田土壤氮素积累和淋溶调控措施在实际生产中的应用。因此,加强土壤和作物氮素速测技术的发展和运用,可以增强田间试验结果在实际生产中的实用性。通过研究发现,荒漠绿洲土壤无机氮组分中 90% 以上是硝态氮^[55],因此土壤无机氮的测试就可以简化为土壤硝态氮的测试。张福锁等^[55]创建在田间条件下用 1:1 水土比快速浸提土壤硝态氮、用反射仪进行浸提液硝态氮快速定量,从而确定根层土壤硝态氮含量的新方法。该方法可以在田间迅速完成土壤硝态氮含量的分析测定工作,且不需要大型仪器和专门的技术人员,分析费用低廉,具有较强的可操作性。同时,一些植株氮素快速测试技术的运用,可以在通过研究结果制定的绿洲农田土壤氮素积累和淋溶调控措施的实际推广中广泛应用。

测土配方施肥是以土壤测试和肥料田间试验为基础,根据作物需肥规律、土壤供肥性能和肥料效应,提出肥料的施用数量、施肥时期和施用方法。通过在田间试验基础上获得的基础数据,在整个绿洲范围内开展农田土壤测试工作,在了解绿洲土壤供肥能力的基础上,根据气候、地貌、土壤、耕作制度等相似性和差异性,划分不同区域施肥分区,提出不同作物的施肥配方。通过测土配方施肥技术应用,可以有效调节和解决作物氮素需求量与土壤供氮量之间的矛盾,实现氮素平衡供应,满足作物的需要,通过减少不必要的肥料投入而减少土壤氮素积累和淋溶量,从而达到既提高资源利用率,又能够改善绿洲农田环境、减缓地下水氮污染风险的目的。

3.3 提高土壤氮素积累和淋失数值模拟的精度和准确度,为绿洲氮污染状况评价和识别提供依据

通过建立不同气候、土壤和农田管理条件下土壤氮素积累和淋失的模型,正确预测区域氮素积累和淋溶的现状,并将其作为区域氮污染状况评价和识别的工具,在此基础上采取适宜的措施缓解土壤氮素积累和淋

溶及其所导致的地下水氮污染,是实现维持和稳定绿洲农田生态系统环境健康的有效途径。这就需提高土壤氮素积累和淋失模型的精度和准确度,使模型的预测结果能够代表绿洲土壤氮素积累和淋溶的实际状况。

水氮过程模型在土壤氮素积累和淋溶方面的研究和应用在国外已经具有一定基础和规模,但在国内尤其在干旱半干旱荒漠绿洲区域还处于初试阶段,大量研究仍缺乏大规模应用的条件,推广范围局限性也很大。存在的主要问题有:(1)对水氮运移的微观机制及田间土壤理化性质对其的影响机制了解程度还有所欠缺;(2)一些精密测量仪器的缺乏也制约了荒漠绿洲对土壤水氮运移物理模型深入研究开发及应用;(3)建立物理模型必要的参数数据库也比较缺乏,尤其在荒漠绿洲土壤水氮运移系统模型研究的起步较晚,目前也只在内蒙古等^[1]个别区域进行了尝试性研究,缺乏对模型进一步创新的基础数据。

因此,针对以上问题,提出以下建议以进一步使荒漠绿洲水氮运移模型得到更好的发展完善和运用。(1)将对不同区域不同类型土壤的模型参数研究作为荒漠绿洲土壤水氮运移物理模型研究的重点,为深入发展水氮过程模型提供重要的数据基础和前提。(2)研究不同模型在绿洲不同地区的适宜度,在模型的实际验证过程中扩充模型的各项参数。(3)通过模型的不断改进和随机参数的引入,增强模型的适应性,推广模型的实用性。(4)加强模型与计算机技术及RS、GIS技术的紧密结合,不仅使一些地面数据的获取更为便易,加强了模型的可操作性,还可以促进模型的应用范围从农田尺度和小区域尺度扩大到整个绿洲尺度上。

4 结论与展望

氮素循环是绿洲农田生态系统的基本生态特征,作物对氮素的吸收利用及土壤氮素积累和分布的规律,决定了农田生产力的发展和由此对环境造成的影响,是绿洲农田生态系统可持续发展和绿洲稳定性研究的一个重要方面。可以看出,资源投入量的增加和粗放的耕作方式使绿洲农田氮素积累和淋溶问题逐渐突出,对绿洲环境及人类健康的威胁日益加大。尽管针对一些绿洲地区已开展了一些农田氮素积累和淋溶的研究工作,但仍有很多亟待解决的问题:

(1)绿洲农田氮素积累和淋溶的区域评价。气候、土壤、社会经济等条件的区域差异导致农田氮素积累和淋溶特征及对区域水资源危害程度的不同。因此,针对不同的绿洲区域及其环境条件,相应的调控对策也应有所不同。因此,区域地下水氮污染调查、农田氮素积累和淋溶评价等方面的研究工作就显得尤为重要。

(2)大面积推广农田管理技术对土壤氮素积累和淋溶影响的研究。目前,针对绿洲农田特殊的环境条件,许多农田管理措施如垄作沟灌技术、秸秆还田技术、膜下滴灌技术(目前,新疆绿洲农田膜下滴灌技术面积达3000多万亩)正被大面积推广,但这些技术对土壤氮素积累和淋溶以及区域水环境的影响仍缺乏系统研究,这方面的工作在今后仍需进一步开展。

(3)农田氮素积累和淋溶调控中的人文因素。缓解绿洲农田土壤氮素积累和淋溶不仅仅是通过将田块尺度进行的农田试验进行推广来实现,也需要政策和技术的引导。农田氮素积累和淋溶调控对策的制定与实施都离不开农户的参与,因此,如何将农户即得的利益与调控策略有机的结合起来、哪些因素影响农户参与调控对策实施的积极性以及如何达到经济效益与环境效益同步提高的目标是需要进一步研究的内容。

References:

- [1] Smith K A, Anthony S G, Henderson D, Jackson D R. Critical drainage and nitrate leaching losses from manures applied to freely draining soils in Great Britain. *Soil Use and Management*, 2003, 19(4): 312-320.
- [2] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, Roelcke M. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China. *Ambio*, 2004, 33(6): 299-304.
- [3] Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, Zhang L X. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. *Science and Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.
- [4] Fang Q X, Yu Q, Wang E L, Chen Y H, Zhang G L, Wang J, Li L H. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *Plant and Soil*, 2006, 284(1/2): 335-350.
- [5] Halvorson A D, Brian J W, Alfred L B. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system. *Agronomy*

- Journal, 2001, 93(4): 836-841.
- [6] Kirchmann H, Johnny Johnston A E, Bergström L F. Possibilities for reducing nitrate leaching from agricultural land. *Ambio*, 2002, 31(5): 404-408.
- [7] Addiscott T M. fertilizers and nitrate leaching // Hester R E, Harrison R M, eds. *Agricultural Chemicals and the Environment. Issues in Environmental Science Technology*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 1996, 5: 1-26.
- [8] Zhu Z L. Loss of fertilizer n from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [9] Sun B, Zheng X Q, Hu F, Li H X, Kong B, Wang L L, Sui Y Y. Effect of temperature, rainfall and soil properties on farmland soil nitrification. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 206-212.
- [10] Li W X, Li L, Sun J H, Guo T W, Zhang F S, Bao X G, Peng A P, Tang C. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 105(3): 483-491.
- [11] Yang S M, Li F M, Suo D R, Guo T W, Wang J G, Sun B L, Jin S L. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2043-2052.
- [12] Hu K L, Li B G, Chen D L, Zhang Y P, Edis R. Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(10): 1180-1188.
- [13] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W, Liu H Y, Li Y L. Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao irrigation district, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2027-2032.
- [14] Wang P, Tian C Y, Zhao Z Y. Investigation on the soil nitrate-nitrogen leaching in vegetable plots in the suburbs of Xinhe county town, Xingjiang. *Arid Zone Research*, 2004, 21(1): 64-66.
- [15] Zotarelli L, Scholberg J M, Dukes M D, Muñoz-Carpena R. Monitoring of nitrate leaching in sandy soils; comparison of three methods. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(4): 953-962.
- [16] Simmelsgaard S E. The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use and Management*, 1998, 14(1): 30-36.
- [17] Bi J W, Zhang J B, Chen X M, Zhu A N, Feng J. Modeling of soil water drainage and nitrate N leaching in arable soils. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6): 23-26.
- [18] Ye Y L, Li L. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitroge use efficiency for wheat/maize intercropping. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 33-39.
- [19] Hu M F, Tian C Y, Lu Z Z, Liu H P, Chen T. Effects of N rate on cotton yield and nitrate-N concentration in plant tissue and soil. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Nature Science Edition*, 2006, 34(4): 63-68.
- [20] Guo S L, Zhang W J, Dang Y H, Wu J S, Hao M D. Accumulation of NO_3^- -N in deep layers of dry farmland and its affecting factors in arid and semi-arid areas. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 584-591.
- [21] Hu K L, Li Y, Chen W P, Chen D L, Wei Y P, Edis R, Li B G, Huang Y F, Zhang Y P. Modeling nitrate leaching and optimizing water and nitrogen management under irrigated maize in desert oases in Northwestern China. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(2): 667-677.
- [22] Yang R, Su Y Z. Effects of farmland use type and winter irrigation on nitrate accumulation in sandy farmland soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 615-623.
- [23] Hou Z N, Li P F, Li B G, Gong J, Wang Y N. Effects of fertigation scheme on N uptake and N use efficiency in cotton. *Plant and Soil*, 2007, 290(1/2): 115-126.
- [24] Jiang Y J, Zhen D M, Lu S Q, Liu W Y, Wang J Q. Space distribution characteristic of soil available nitrogen under film trickle irrigation in cotton field in Xinjing. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(6): 808-813.
- [25] Benbi D K, Biswas C R, Kalkat J S. Nitrate distribution and accumulation in an Ustochrept soil profile in a long-term fertilizer experiment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1991, 28(2): 173-177.
- [26] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Effects of fertilization on wheat yield, NO_3^- -N accumulation and soil water content in semi-arid area of China. *Scientia Agriculture Sinica*, 2005, 38(4): 754-760.
- [27] Jiang X D, Li Z J, Hou LT, Wang Y, Wang X, Yan H. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^- -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn on cultivation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 20-24.
- [28] Yang R, Su Y Z. Effects of farming systems on soil nitrate accumulation and crop yield in sandy soil field in the middle reaches of Heihe river basin, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 30(1): 120-126.
- [29] Bu Y S, Miao G Y, Zhou N J, Shao H L, Wang J C. Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility. *Scientia Agriculture Sinica*, 2006, 39(5): 1069-1075.

- [30] Bu Y S, Shao H L, Wang J C, Miao G Y. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 322-326.
- [31] Vyn T J, Janovicek K J, Miller M H, Beauchamp E G. Soil nitrate accumulation and corn response to preceding small-grain fertilization and cover crops. *Agronomy Journal*, 1999, 91(1): 17-24.
- [32] Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, Zhang W L, Lin B. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 405-413.
- [33] Li B G, Hu K L, Huang Y F, Liu G. Advances in modeling and applications of soil solute transport. *Soils*, 2005, 37(4): 345-355.
- [34] Zhang Q Z, Chen X, Shen S M. Advances in studies on accumulation and leaching of nitrate in farming soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 233-238.
- [35] Hu K L, Li B G, Huang Y F, Chen D L, White R E. Stochastic simulation and risk assessment of nitrate leaching at field scale. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 909-914.
- [36] Ma J H, Ren L. Numerical simulation on nitrate leaching at field scale during the growth of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2289-2301.
- [37] Ren L, Ma J H. Transfer function model considering the transformation of nitrate nitrogen. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 32(5): 38-44.
- [38] Hu K L, Li B G, Chen Y, Guo Y Q. Coupled simulation of crop growth with soil water-heat-nitrogen transport I. Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 779-785.
- [39] Wei Y P, Chen D L, Hu K L, Willett I R, Langford J. Policy incentives for reducing nitrate leaching from intensive agriculture in desert oases of Alxa, Inner Mongolia, China. *Agricultural Water Management*, 96(7): 1114-1119.
- [40] Fixen P E, West F B. Nitrogen fertilizers: meeting contemporary challenges. *Ambio*, 2002, 31(2): 169-176.
- [41] Yang L Z, Sun B. *Nutrient Cycling, Balance and Its Management in Farmland Ecosystem of China*. Beijing: Science Press, 2008: 182-199.
- [42] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, Yan X D, Huang Y, Han S H, Hu F, Chen G X. The Asian nitrogen cycle case study. *Ambio*, 2002, 31(2): 79-87.
- [43] Kumazawa K. Nitrogen fertilization and nitrate pollution in groundwater in Japan: present status and measures for sustainable agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 129-137.
- [44] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, Keating B A. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(1): 49-58.
- [45] Zhao T K, Zhang C J, Du L F, Liu B C, An Z Z. Investigation on nitrate concentration in groundwater in seven provinces(city) surrounding the Bo-hai Sea. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 779-783.
- [46] Dong Z H, Li J, Sun L M. Nitrate contamination in the groundwater of intensive vegetable cultivation areas in Shouguang city, Shandong province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1139-1144.
- [47] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater in Northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1996, 59(3): 223-231.
- [48] Yang R, Liu W J. Nitrate contamination of groundwater in an agroecosystem in Zhangye Oasis, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(1): 123-129.
- [49] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, Goulding K W T. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(5): 904-910.
- [50] Wang Q X, Wang P, Shen L X, Wang L X, Zhang H F, Qu Z X. Effect of nitrogen application time on dynamics of nitrate content and apparent nitrogen budget in the soil of summer maize fields. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1582-1588.
- [51] Zhang Y G, Liu H B, Li Z H, Lin B, Zhang F D. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 711-716.
- [52] Lu Y L, Lu W P, Liu X B, Wang J F, Liu P, Lu D L, Su H. Genotype differences of fertilizer nitrogen use efficiency in waxy corn. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(7): 1031-1037.
- [53] Sun Z Q, Kang Y H, Liu H J. Effects of sprinkler irrigation on soil nitrate-N distribution and nitrogen uptake of winter wheat under the field conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(6): 136-143.
- [54] Thorup-Kristensen K. Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot. *Water Resource Research*, 2001, 27(6): 201-206.
- [55] Zhang F S, Shen J B, Feng G. *Rhizosphere Ecology — Process and Control*. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 314-314.

参考文献:

- [3] 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.
- [8] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 生态环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [9] 孙波, 郑宪清, 胡峰, 李辉信, 孔滨, 王帘里, 隋跃宇. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响. 环境科学, 2009, 30(1): 206-212.
- [11] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 郭天文, 汪建国, 孙炳玲, 金绍龄. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2043-2052.
- [13] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜, 刘宏云, 李延林. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2027-2032.
- [14] 王平, 田长彦, 赵振勇. 新疆新和县郊区菜地硝态氮的淋洗调查. 干旱区研究, 2004, 21(1): 64-66.
- [17] 毕经纬, 张佳宝, 陈效民, 朱安宁, 冯杰. 农田土壤中土壤水渗漏与硝态氮淋失的模拟研究. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 23-26.
- [18] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33-39.
- [19] 胡明芳, 田长彦, 吕昭智, 刘宏萍, 陈涛. 氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 63-68.
- [20] 郭胜利, 张文菊, 党延辉, 吴金水, 郝明德. 干旱半干旱地区农田土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 深层积累及其影响因素. 地球科学进展, 2003, 18(4): 584-591.
- [22] 杨荣, 苏永中. 农田利用方式和冬灌对沙地农田土壤硝态氮积累的影响. 应用生态学报, 2009, 20(3): 615-623.
- [24] 姜益娟, 郑德明, 吕双庆, 柳维杨, 王家强. 新疆膜下滴灌棉田土壤有效态氮空间分布特征. 新疆农业科学, 2007, 44(6): 808-813.
- [26] 郭胜利, 党延辉, 郝明德. 施肥对半干旱地区小麦产量、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累和水分平衡的影响. 中国农业科学, 2005, 38(4): 754-760.
- [27] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 王芸, 王雪, 颜红. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20-24.
- [28] 杨荣, 苏永中. 农作制度对黑河中游沙质土壤硝态氮积累及作物产量的影响. 农业环境科学学报, 2010, 30(1): 120-126.
- [29] 卜玉山, 苗果园, 周乃健, 邵海林, 王建程. 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较. 中国农业科学, 2006, 39(5): 1069-1075.
- [30] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 苗果园. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 322-326.
- [32] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 张维理, 林葆. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 405-413.
- [33] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 刘刚. 土壤溶质运移模型的研究及应用. 土壤, 2005, 37(4): 345-355.
- [34] 张庆忠, 陈欣, 沈善敏. 农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展. 应用生态学报, 2002, 13(2): 233-238.
- [35] 胡克林, 李保国, 黄元仿, 陈德立, White R E. 农田尺度下土体硝酸盐淋失的随机模拟及其风险性评价. 土壤学报, 2005, 42(6): 909-914.
- [36] 马军花, 任理. 冬小麦生育期农田尺度下土壤硝态氮淋失动态的数值模拟. 生态学报, 2004, 24(10): 2289-2301.
- [37] 任理, 马军花. 考虑土壤中硝态氮转化作用的传递函数模型. 水利学报, 2001, 32(5): 38-44.
- [38] 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.
- [41] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理. 北京: 科学出版社, 2008: 182-199.
- [45] 赵同科, 张成军, 杜连凤, 刘宝存, 安志装. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 779-783.
- [46] 董章杭, 李季, 孙丽梅. 集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究——以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1139-1144.
- [50] 王启现, 王璞, 申丽霞, 王秀玲, 张红芳, 翟志席. 施氮时期对玉米土壤硝态氮含量变化及氮盈亏的影响. 生态学报, 2004, 24(8): 1582-1588.
- [51] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 林葆, 张夫道. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 711-716.
- [52] 卢艳丽, 陆卫平, 刘小兵, 王继丰, 刘萍, 陆大雷, 苏辉. 糯玉米氮肥利用效率的基因型差异. 作物学报, 2006, 32(7): 1031-1037.
- [53] 孙泽强, 康跃虎, 刘海军. 喷灌冬小麦农田土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分布特征及作物吸氮规律. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 136-143.
- [55] 张福锁, 申建波, 冯固. 根际生态学——过程与调控. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 314-314.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique SUN Caizhi, YANG Lei (1016)

Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)

The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)

Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)

Analysis of a dust case using lidar in Shanghai MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)

Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)

Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* LI Hui, WANG Jiangtao (1115)

Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)

On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)

Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)

The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)

The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)

Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)

Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)

The evaluation system of strength of winteriness in wheat WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)

Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)

Seasonal characteristics of CO₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)

Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)

Review and Monograph

Recent advances in wetland degradation research HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)

Discussion

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

Scientific Note

Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)

Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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)

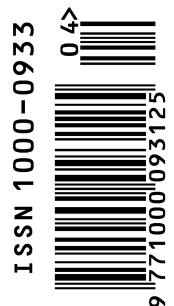
第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 2012

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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@esp. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ esp. 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