

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

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 33 卷 第 7 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112211941

郑成岩, 于振文, 张永丽, 王东, 石玉, 许振柱. 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响. 生态学报, 2013, 33(7): 2260-2271.

Zheng C Y, Yu Z W, Zhang Y L, Wang D, Shi Y, Xu Z Z. Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2260-2271.

土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响

郑成岩^{1,2}, 于振文¹, 张永丽^{1,*}, 王东¹, 石玉¹, 许振柱³

(1. 山东农业大学农学院/农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 泰安 271018;

2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081;

3. 中国科学院植物研究所/植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 研究一次深松耕作后土壤水分对冬小麦籽粒产量和水分利用率的影响, 为小麦节水高产栽培提供理论依据。于 2008—2009 和 2009—2010 两个小麦生长季, 选用高产小麦品种济麦 22, 采取测墒补灌的方法, 研究了深松+旋耕和旋耕 2 种耕作方式下土壤水分对小麦 0—200 cm 土层土壤含水量、干物质积累与分配、籽粒产量及水分利用率的影响。结果表明, (1) 深松+旋耕 40—180 cm 土层土壤含水量低于旋耕处理; 旗叶光合速率和水分利用率, 开花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率显著高于旋耕处理。(2) W3(补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期为 85%, 越冬期 80%, 拔节和开花期 75%) 成熟期 0—200 cm 土层土壤含水量与 W1(播种期 80%, 越冬期 80%, 拔节和开花期 75%) 和 W2 处理(播种期 80%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75%) 无显著差异; W3 和 W'3(播种期 85%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75%) 60—140 cm 土层土壤含水量分别低于 W4(播种期 85%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75%) 和 W'4(播种期 90%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75%) 处理; W3 和 W'3 灌浆中后期旗叶光合速率较高, 开花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率显著高于其他处理, 获得高的籽粒产量和水分利用率。综合考虑籽粒产量、水分利用率和灌溉效益, 在深松+旋耕条件下, 两年度分别以 W3 和 W'3 为节水高产的最佳处理。

关键词: 小麦; 土壤深松; 干物质积累与分配; 水分利用率; 籽粒产量

Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat

ZHENG Chengyan^{1,2}, YU Zhenwen¹, ZHANG Yongli^{1,*}, WANG Dong¹, SHI Yu¹, XU Zhenzhu³

1 Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture / Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2 Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture / Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change / Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Simultaneous increase of grain yield and water use efficiency is an imperative solution and a hot focus on crop production and research, especially in northern plain of China where winter wheat (*Triticum aestivum*) is the largest water-consumed crop. The objective of this study was to optimize irrigation scheduling for both high grain yield and water use efficiency of wheat with different tillage practices. Unlike earlier studies in which fixed irrigation amounts were given, a strategy of water-controlled irrigation based on measuring soil water content was adopted to study changes in soil water content in 0—200 cm at maturity, dry matter accumulation and distribution, grain yield, and water use efficiency. In a

基金项目: 国家自然科学基金(31171498); 国家小麦产业技术体系项目(CARS-3-1-19)

收稿日期: 2011-12-21; **修订日期:** 2012-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyl@sdau.edu.cn

continuous experiment across two growing seasons from 2008 to 2010, we planted wheat cultivar Jimai 22 with two tillage treatments including rotary tillage after subsoiling (RS) and rotary tillage (R). In the 2008—2009 growing season, the irrigation treatments were designed as no irrigation (W0), relative water content (RWC) of 80% at sowing, 80% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W1); RWC of 80% at sowing, 85% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W2); RWC of 85% at sowing, 80% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W3); RWC of 85% at sowing, 85% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W4). In the 2009—2010 growing season, the irrigation treatments were designed as no irrigation (W'0), RWC of 85% at sowing, 85% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W'3); RWC of 85% at sowing, 90% at wintering, 75% at jointing, and 75% at anthesis (W'4). Under the same irrigation treatment, soil water content in 40—180 cm soil layers of RS was lower than that of R practice, whereas the flag leaf photosynthetic rate (P_n), dry matter accumulation after anthesis and its contribution to grain in RS treatment were significantly higher than those in R treatment. Compared with both W4 and W'4 treatments, soil water contents in 60—140 cm soil layers of W3 and W'3 treatments were lower at maturity. However, there was no significantly difference among W1, W2 and W3 treatments. Under the same tillage treatment, P_n at late filling stage, dry matter distribution amount in grain at maturity, dry matter accumulation after anthesis and its contribution to grain in W3 and W'3 treatments were significantly higher than those in other treatments, subsequently obtaining higher the grain yield and water use efficiency. In wheat growing environment similar to the condition of this experiment, we propose the best tillage is RS, and the best irrigating regimes are W3 treatment with the precipitation of 13.8 mm from sowing to wintering stage in 2008—2009, and W'3 treatment with the precipitation of 48.1 mm from sowing to wintering stage in 2009—2010.

Key Words: wheat; subsoiling; dry matter accumulation and contribution; water use efficiency; grain yield

在我国北方地区,灌溉是小麦获得高产的重要措施。Li 等^[1-3]研究表明,限量灌溉有利于小麦干物质积累,促进籽粒灌浆,最终提高产量。高产小麦开花后干物质积累量占籽粒产量的 80% 以上^[4],随灌水量的增大开花后干物质积累量提高,灌水量过多显著减少干物质向籽粒的分配,籽粒产量降低^[5]。刘庚山等^[6]研究认为,在春季灌水总量一定的条件下,拔节期灌水能促进作物对深层土壤水的利用,提高水分利用率和灌溉效率。通过优化耕作措施,可以充分利用降水资源,提高水分利用率和作物产量^[7]。在旱作条件下,免耕覆盖可以使小麦籽粒产量提高 19.3%^[8],但多年少免耕导致土壤坚实,土壤容重增大,影响作物根系对土壤养分和水分的吸收,不利于产量的提高^[9-10]。深松耕作通过深松铲疏松土壤,可降低土壤容重,增加土壤通透性^[11-12],有利于改善旗叶光合性能,提高植株干物质积累量,增加对小麦籽粒源的供应,提高穗粒数和千粒重,获得较高的产量^[8, 13]。前人就耕作方式和土壤水分单一因素对小麦产量形成的影响已有研究,并多采用定量灌溉的方法,未考虑实际的土壤水分状况,而且就深松的后续效果尚少见报道。本文以 0—140 cm 土层平均土壤相对含水量为目标含水量,采用测墒补灌的方法,研究 1 次深松耕作后土壤水分对冬小麦籽粒产量和水分利用率影响的后效,为制定小麦节水高产栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2008—2009 和 2009—2010 小麦生长季在 2007—2008 年试验^[14]的同一地块上进行定位试验,供试品种为高产中筋小麦济麦 22。2007—2008 生长季设置 2 种耕作方式,分别为旋耕(R, Rotary tillage)和深松+旋耕(RS, Rotary tillage after subsoiling)。2008—2009 和 2009—2010 生长季的“深松+旋耕”处理不再深松,以研究土壤经一次深松耕作后对小麦籽粒产量和水分利用率影响的后效,降低机械作业成本。

2008—2009 生长季,每种耕作方式下设置 5 个土壤水分处理(表 1)。播种前试验田 0—20 cm 土层含有有机质 14.5 g/kg、全氮 10.3 g/kg、碱解氮 106.81 mg/kg、速效磷 35.18 mg/kg 和速效钾 116.90 mg/kg。小麦生育期间降水量为:播种至越冬期 13.8 mm、越冬至拔节期 46.9 mm、拔节至开花期 53.6 mm、开花至成熟期

26.3 mm。播种前每公顷施纯氮 105 kg, P_2O_5 150 kg, K_2O 150 kg, 拔节期每公顷开沟追施纯氮 135 kg。2008 年 10 月 8 日播种, 2009 年 6 月 10 日收获。

2009—2010 生长季, 每种耕作方式下设置 3 个土壤水分处理(表 1)。播种前试验田 0—20 cm 土层含有有机质 14.8 g/kg、全氮 10.6 g/kg、碱解氮 104.30 mg/kg、速效磷 34.55 mg/kg 和速效钾 124.92 mg/kg。小麦生育期间降水量为: 播种至越冬期 48.1 mm、越冬至拔节期 46.1 mm、拔节至开花期 27.0 mm、开花至成熟期 42.0 mm。化肥施用量与 2008—2009 生长季相同。2009 年 10 月 9 日播种, 2010 年 6 月 17 日收获。

两生长季小区面积均为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} = 16\text{ m}^2$, 小区间设 2 m 宽保护行, 随机区组设计, 3 次重复; 四叶期定苗, 留苗密度 180 株/ m^2 ; 按当地高产田进行田间管理。

表 1 水分处理方案

Table 1 Water treatment design

年份 Year	处理 Treatment	目标含水量 Target water content/%			
		播种期 Sowing/%	越冬期 Wintering/%	拔节期 Jointing/%	开花期 Anthesis/%
2008—2009	W0	—	—	—	—
	W1	80	80	75	75
	W2	80	85	75	75
	W3	85	80	75	75
	W4	85	85	75	75
2009—2010	W'0	—	—	—	—
	W'3	85	85	75	75
	W'4	85	90	75	75

—: 不灌水; 土壤相对含水量数据为 0—140 cm 土层平均值; W0 和 W'0 为不进行补灌处理; W1 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 80%, 越冬期 80%, 拔节和开花期 75% 处理; W2 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 80%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75% 处理; W3 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期为 85%, 越冬期 80%, 拔节和开花期 75% 处理; W'3 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 85%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75% 处理; W'4 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 90%, 越冬期 85%, 拔节和开花期 75% 处理

1.2 土壤耕作程序

1.2.1 深松+旋耕

前茬玉米秸秆全部粉碎还田→撒施底肥→ZS-180 型振动深松机深松 1 遍(深度 38 cm)→旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm)→耙地 2 遍→筑埂打畦→机播下种。

1.2.2 旋耕

前茬玉米秸秆全部粉碎还田→撒施底肥→旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm)→耙地 2 遍→筑埂打畦→机播下种。

1.3 旗叶光合速率和蒸腾速率的测定

用英国 PP-System 公司产 CIRAS-2 型光合作用测定系统, 分别于灌浆初期、灌浆中期和灌浆后期 9:00—11:00, 于自然光照下测定旗叶光合速率和蒸腾速率^[15]。

旗叶瞬间水分利用率用叶片蒸腾消耗一定量的水所同化的 CO_2 量来表示, 即 $LWUE = P_n/T_r$ 。式中, $LWUE$ 为旗叶瞬间水分利用率($\mu\text{mol } CO_2/\text{mmol } H_2O$)。 P_n 和 T_r 分别为净光合速率($\mu\text{mol } CO_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和蒸腾速率($\text{mmol } H_2O \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.4 土壤含水量测定及灌水量计算

于每次灌水前 2 d 用土钻取 0—200 cm 土层的土壤, 每 20 cm 为一层, 将样品立即装入铝盒, 称鲜重, 110 °C 烘干至恒重, 称干重, 计算 0—200 cm 土层土壤质量含水量。需补充的灌水量依据公式 $m = 10\rho bH(\beta_i - \beta_j)$ 计算, 以达到目标含水量^[16], 即测墒补灌, 式中 m 为灌水量(mm), H 为该时段土壤计划湿润层的深度(本试验为 140 cm), ρb 为计划湿润层内土壤容重(g/cm^3), β_i 为设计的质量含水量(田间持水量乘以设计相对含水

量) β_j 为灌溉前土壤质量含水量。用水表计量灌水量。于灌水后 3d 测定 0—140 cm 土层土壤平均相对含水量。

两个生长季均按计算结果补充灌水量,2008—2009 生长季,深松+旋耕和旋耕方式下,补充灌溉后测定的土壤相对含水量的相对误差平均值(以下简称调控误差)播种期分别为 0.93% 和 1.45%,越冬期分别为 1.24% 和 1.36%,拔节期分别为 0.80% 和 0.94%,开花期分别为 1.08% 和 0.56%。2009—2010 生长季,播种期的调控误差分别为 0.98% 和 0.25%;越冬期分别为 0.38% 和 1.44%;拔节期分别为 0.65% 和 1.49%;开花期分别为 1.78% 和 1.05%(表 2)。表明根据灌水前测定的土壤含水量补充灌溉,能够达到预期设计的目标含水量。

表 2 不同处理 0—140 cm 土层的目标含水量和土壤相对含水量

Table 2 Target water content and relative water content in 0—140 cm soil layer of different treatments

处理 Treatment		播种期 Sowing			越冬期 Wintering			拔节期 Jointing			开花期 Anthesis		
		TWC/%	RWC/%	RE/%	TWC/%	RWC/%	RE/%	TWC/%	RWC/%	RE/%	TWC/%	RWC/%	RE/%
2008—2009													
深松+旋耕	W0	81.1		78.4		63.1		58.5					
Rotary tillage	W1	80	81.1	1.35	80	78.4	2.06	75	75.6	0.83	75	75.5	0.64
after subsoiling	W2	80	81.1	1.35	85	85.5	0.54	75	74.5	0.66	75	75.2	0.24
	W3	85	85.1	0.11	80	78.6	1.70	75	74.0	1.29	75	76.4	1.83
	W4	85	85.8	0.90	85	85.6	0.66	75	74.7	0.41	75	73.8	1.59
旋耕	W0	81.5		78.4		62.4		58.2					
Rotary tillage	W1	80	81.5	1.89	80	78.4	1.98	75	74.3	0.97	75	74.9	0.14
	W2	80	81.5	1.89	85	85.8	0.88	75	75.5	0.64	75	74.4	0.79
	W3	85	85.8	0.89	80	78.7	1.68	75	76.0	1.30	75	74.3	0.89
	W4	85	85.9	1.11	85	85.8	0.91	75	74.4	0.85	75	75.3	0.40
2009—2010													
深松+旋耕	W'0	85.8		85.1		69.0		59.0					
Rotary tillage	W'3	85	85.8	0.98	85	85.1	0.16	75	74.3	0.89	75	73.5	1.96
after subsoiling	W'4	85	85.8	0.98	90	89.5	0.60	75	74.7	0.41	75	76.2	1.59
旋耕	W'0	85.2		85.8		68.8		60.7					
Rotary tillage	W'3	85	85.2	0.25	85	85.8	0.93	75	75.9	1.17	75	75.6	0.81
	W'4	85	85.2	0.25	90	91.8	1.94	75	76.4	1.81	75	74.0	1.28

TWC:目标含水量 Target water content;RWC:相对含水量 Relative water content;RE:相对误差 Relative error

1.5 农田耗水量及水分利用率和灌溉效益计算

采用测定土壤含水量计算耗水量的方法^[17], $ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 式中 ET_{1-2} 为阶段耗水量; i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤干容重; H_i 为第 i 层土壤厚度; θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的含水量,以占干土重的百分数计; M 为时段内的灌水量; P_0 为有效降水量; K 为时段内的地下水补给量。本试验研究 0—200 cm 土层的土壤含水量,而该试验区地下水埋深在 5 m 以下,因此可视地下水补给量为 0。

水分利用率、灌溉效益的计算公式分别为 $WUE = Y/ET_\alpha$ ^[18] 和 $IB = \Delta Y/I$ ^[19], 式中 WUE 为水分利用率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), Y 为籽粒产量 (kg/hm^2), ET_α 为小麦生育期间实际耗水量 (mm), 即各阶段耗水量之和; IB 为灌溉效益 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), ΔY 为灌溉后增加的产量 (kg/hm^2), I 为实际灌水量 (mm)。

1.6 干物质积累与分配

于越冬、返青、拔节、开花和成熟期进行群体动态调查和取样,其中前 3 个生育期留取整株样品,开花期分为穗、叶片和茎秆+叶鞘 3 部分,成熟期分为籽粒、叶片、茎秆+叶鞘和颖壳+穗轴 4 部分,样品于 80 ℃ 烘至恒重,称干重。计算公式^[20]如下:

营养器官开花前贮藏同化物转运量 = 开花期植株干重-成熟期营养器官干重

营养器官开花前贮藏同化物转运率(%) = (开花期植株干重 - 成熟期营养器官干重) / 开花期植株干重 × 100

开花后同化物输入籽粒量 = 成熟期籽粒干重 - 营养器官开花前贮藏同化物转运量

营养器官开花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率(%) = 营养器官开花前贮藏同化物转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100

1.7 数据处理与分析方法

用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据计算和作图,用 DPS7.05 统计分析软件进行数据差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对成熟期 0—200 cm 土层土壤含水量的影响

由图 1 可知,2008—2009 生长季,同一水分处理条件下,旋耕处理 0—200 cm 土层的土壤含水量高于深松 + 旋耕处理,分别高 13.0%、16.4%、11.7%、11.1% 和 12.8%。旋耕处理 40—180 cm 各土层的土壤含水量均

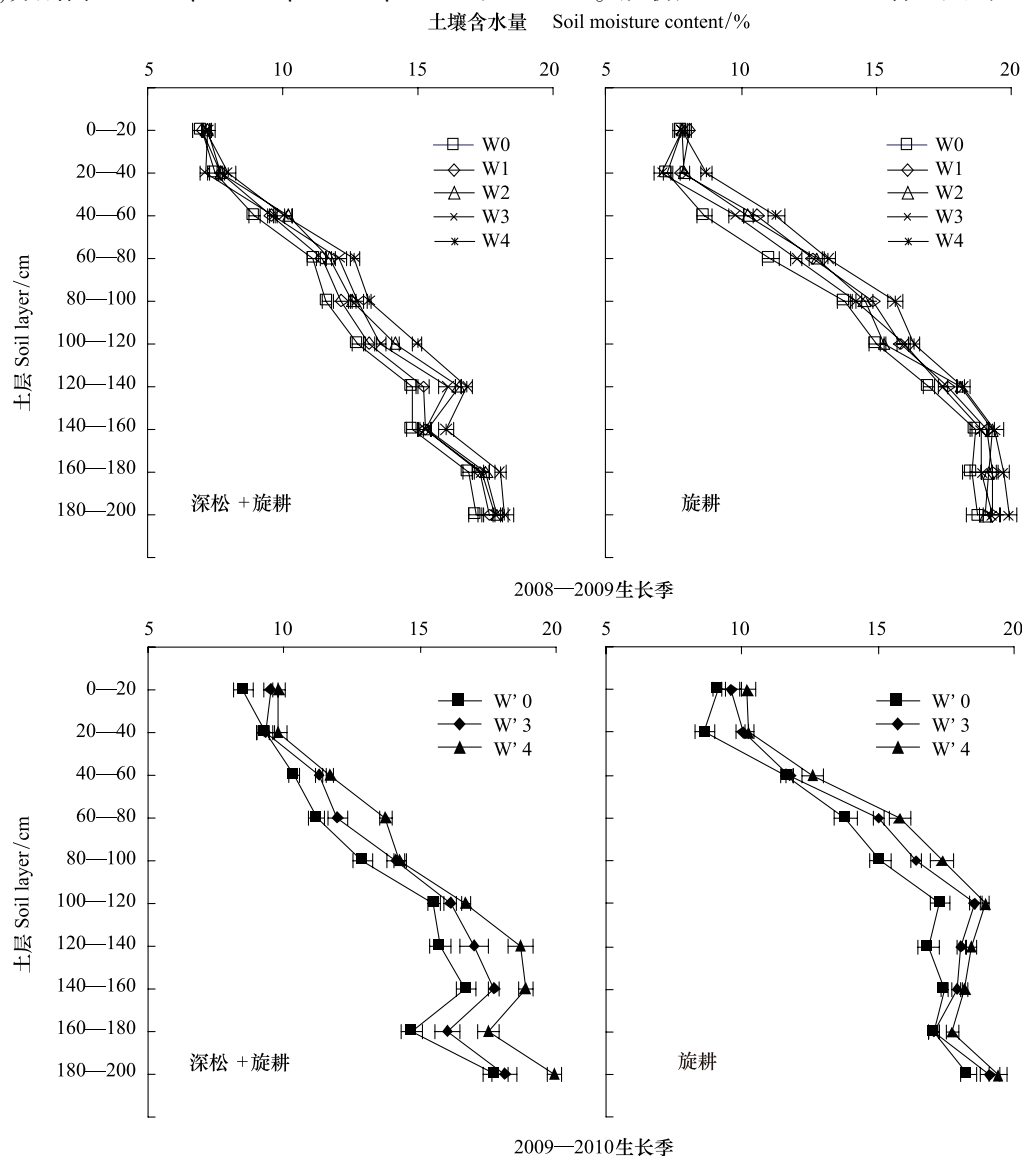


图 1 不同处理对成熟期各土层土壤含水量的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on soil moisture content of different soil layer at maturity

W0 和 W'0 为不进行补灌处理;W1 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 80%,越冬期 80%,拔节和开花期 75% 处理;W2 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 80%,越冬期 85%,拔节和开花期 75% 处理;W3 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期为 85%,越冬期 80%,拔节和开花期 75% 处理;W'3 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 85%,越冬期 85%,拔节和开花期 75% 处理;W'4 为补灌至 0—140 cm 土层土壤相对含水量播种期 90%,越冬期 85%,拔节和开花期 75% 处理

高于深松+旋耕处理,表明深松耕作有利于小麦开花至成熟阶段对深层土壤水分的消耗,成熟期 0—200 cm 土层的土壤含水量降低。

同一耕作方式下,W0 处理 40—200 cm 各土层的土壤含水量均低于灌水处理。深松+旋耕方式下,W3 处理 60—180 cm 各土层的土壤含水量均低于 W4 处理,与 W1 和 W2 处理无显著差异;旋耕方式下,W3 处理 20—140 cm 各土层的土壤含水量均低于 W4 处理,与 W1 和 W2 处理无显著差异。上述结果表明,全生育期补灌水量多,不利于小麦对土壤贮水尤其是 60—140 cm 土层土壤水分的消耗,成熟期土壤含水量高。2009—2010 生长季,旋耕处理 0—200 cm 土层的土壤含水量比深松+旋耕处理分别高 10.2%、9.4% 和 5.9%;各处理土壤水分变化趋势与 2008—2009 生长季一致。

2.2 不同处理对小麦旗叶光合速率、蒸腾速率和旗叶瞬间水分利用率的影响

由表 3 可以看出,同一水分处理下,深松+旋耕处理的旗叶光合速率和瞬间水分利用率均高于旋耕处理,蒸腾速率无显著差异,表明深松有利于小麦在灌浆期维持较高的旗叶光合速率和瞬间水分利用率。

同一耕作方式下,2008—2009 生长季,灌水处理的光合速率、蒸腾速率和旗叶瞬间水分利用率在灌浆期均高于不灌水处理;灌水处理之间比较,光合速率、蒸腾速率、旗叶瞬间水分利用率在灌浆后期为 W4>W3>W2、W1。2009—2010 生长季,W'3 和 W'4 处理灌浆期的光合速率、蒸腾速率和叶片瞬间水分利用率均高于 W'0 处理,W'3 与 W'4 无显著差异。上述结果表明 W3 和 W'3 处理能够保持灌浆后期较高的光合速率,获得较高的旗叶瞬间水分利用率。

表 3 不同处理对小麦旗叶光合特性的影响

Table 3 Effects of different treatments on flag leaf photosynthetic characteristic

处理 Treatment		光合速率			蒸腾速率			旗叶瞬间水分利用率		
		Photosynthetic rate			Transpiration rate			Leaf water use efficiency		
		灌浆初期 Initial filling	灌浆中期 Middle filling	灌浆后期 Late filling	灌浆初期 Initial filling	灌浆中期 Middle filling	灌浆后期 Late filling	灌浆初期 Initial filling	灌浆中期 Middle filling	灌浆后期 Late filling
2008—2009										
深松+旋耕	W0	19.88b	15.45c	6.38d	6.95b	6.04c	5.06d	2.86b	2.56c	1.26d
	W1	25.20a	20.03b	8.50c	7.82a	7.07b	5.68c	3.22a	2.84b	1.50c
	W2	25.87a	20.58b	8.25c	8.06a	7.33ab	5.32c	3.21a	2.81b	1.55c
	W3	24.90a	22.80a	12.61b	8.03a	7.67a	6.38b	3.10a	2.97a	1.98b
	W4	25.85a	23.17a	14.67a	8.16a	7.56a	6.75a	3.17a	3.06a	2.17a
旋耕	W0	17.07b	12.47c	4.67d	6.83b	5.86c	4.80d	2.50b	2.13c	0.97d
	W1	20.98a	16.08b	6.28c	7.51a	6.89b	5.35c	2.80a	2.33b	1.18c
	W2	21.37a	16.40b	6.27c	7.67a	7.06b	5.55c	2.79a	2.32b	1.13c
	W3	21.80a	18.00a	9.20b	7.89a	7.49a	6.26b	2.76a	2.40b	1.47b
	W4	22.42a	18.77a	11.43a	7.84a	7.27ab	6.68a	2.86a	2.58a	1.71a
2009—2010										
深松+旋耕	W'0	19.38b	13.95b	6.01b	6.99b	6.10b	4.37b	2.77b	2.29b	1.37b
	W'3	24.88a	20.95a	11.05a	7.94a	7.12a	6.46a	3.13a	2.94a	1.71a
	W'4	24.76a	21.18a	10.90a	8.08a	7.17a	6.29a	3.07a	2.96a	1.73a
旋耕	W'0	17.05b	10.68b	4.05b	6.55b	5.52b	4.15b	2.61b	1.94b	0.98b
	W'3	22.28a	18.08a	8.25a	7.68a	6.65a	6.14a	2.90a	2.72a	1.34a
	W'4	22.38a	18.46a	8.53a	7.69a	6.60a	5.98a	2.91a	2.80a	1.43a

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5% 显著水平

2.3 不同处理对小麦干物质积累与分配的影响

2.3.1 不同生育时期干物质积累量

由图 2 可以看出,同一水分处理条件下,深松+旋耕处理拔节、开花和成熟期的干物质积累量均高于旋耕处理,表明深松有利于提高小麦拔节后干物质积累量,为高产奠定基础。

同一耕作方式下,2008—2009 生长季,各水分处理的干物质积累量越冬期无显著差异;返青期为 W0、

W1、W2>W3、W4;拔节期为 W4、W3、W2>W1、W0;开花期为 W4>W3、W2、W1>W0;成熟期为 W3、W4>W1、W2>W0。2009—2010 生长季,各水分处理的干物质积累量越冬期亦无显著差异;返青和拔节期 W'4 高于 W'3 和 W'0 处理;开花和成熟期 W'3 和 W'4 高于 W'0 处理,W'3 与 W'4 之间无显著差异。以上结果示出,W3 和 W'3 处理返青期之前干物质积累量较低,拔节期之后均高于播种期和越冬期未灌水的处理,为获得高产奠定了物质基础。

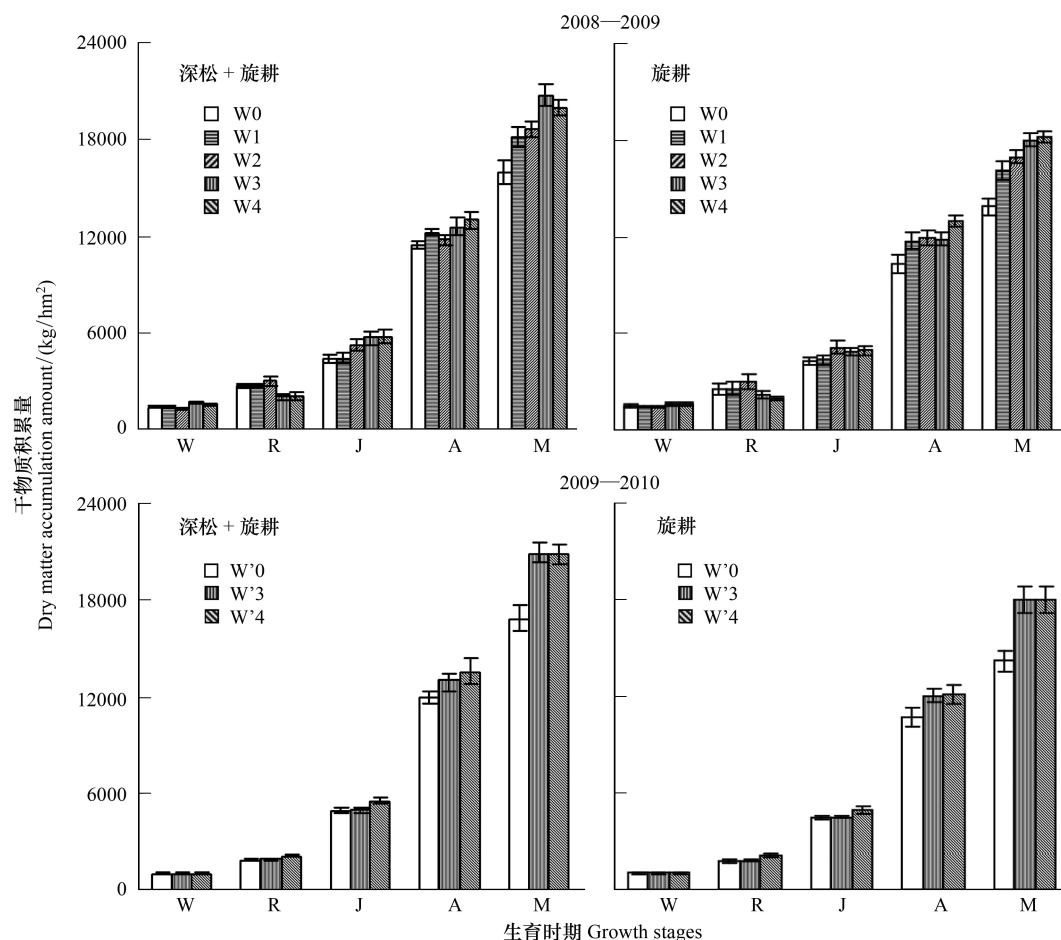


图2 不同处理对冬小麦干物质积累量的影响

Fig. 2 Effect of different treatments on dry matter accumulation amount in winter wheat

W:越冬期 Wintering; R:返青期 Revival; J:拔节期 Jointing; A:开花期 Anthesis; M:成熟期 Maturity

2.3.2 成熟期干物质在不同器官中的分配

由表4可以看出,同一水分处理条件下,深松+旋耕处理成熟期籽粒的干物质分配量和分配比例高于旋耕处理,茎秆+叶鞘+叶片的分配比例低于旋耕处理,表明深松有利于干物质向籽粒分配,其营养器官干物质分配比例低。

2008—2009 生长季,不灌水处理各营养器官的干物质积累量均低于灌水处理,籽粒的分配比例高于灌水处理。深松+旋耕条件下,成熟期干物质在籽粒中的分配量为 W3 和 W4 高于 W2 和 W1 处理,在籽粒和穗轴+颖壳中分配比例为 W1、W2 和 W3 高于 W4 处理,茎秆+叶鞘+叶片分配量及其分配比例为 W4>W3>W2、W1。旋耕条件下,成熟期干物质在籽粒中分配量为 W1、W2 和 W3 高于 W4 处理,分配比例为 W1>W2、W3>W4;在穗轴+颖壳中分配量各处理无显著差异;茎秆+叶鞘+叶片分配及其分配比例为 W4 高于 W3 处理,W3 高于 W2 和 W1 处理。2009—2010 生长季,W'3 成熟期干物质向籽粒和穗轴+颖壳的分配量及其分配比例高于 W'4 处理;茎秆+叶鞘+叶片分配量及其分配比例低于 W'4 处理。表明 W3 和 W'3 处理有利于成熟期干物质积

累量在籽粒中的分配;在此基础上增加补灌水量的 W4 和 W'4 处理,其光合产物过多的滞留于营养器官,不利于向籽粒中转运。

表 4 不同处理对成熟期干物质在不同器官中分配的影响

Table 4 Effects of different treatments on dry matter distribution in different organs at maturity

处理 Treatment		总重 Total/g	籽粒 Grain		穗轴+颖壳 Spike axis & glume		茎秆+叶鞘+叶片 Stem&sheath&leaf	
			数量 Amount/g	比例 Ratio/%	数量 Amount/g	比例 Ratio/%	数量 Amount/g	比例 Ratio/%
2008—2009								
深松+旋耕	W0	2.48c	1.38c	55.8a	0.27c	11.0a	0.82d	33.2d
	W1	2.69b	1.46b	54.2b	0.29ab	11.0a	0.93c	34.8c
	W2	2.67b	1.46b	54.5b	0.30a	11.0a	0.92c	34.5c
	W3	2.91a	1.59a	54.7b	0.28b	9.6b	1.04b	35.7b
	W4	3.09a	1.54a	49.8c	0.30a	9.8b	1.25a	40.4a
旋耕	W0	2.20c	1.15c	52.3a	0.25a	11.2a	0.80d	36.5c
	W1	2.40b	1.26ab	52.4a	0.26a	10.9a	0.88c	36.7c
	W2	2.39b	1.23b	51.4b	0.27a	11.4a	0.89c	37.2c
	W3	2.56a	1.31a	51.3b	0.26a	10.3b	0.98b	38.4b
	W4	2.61a	1.16c	44.7c	0.27a	10.5b	1.17a	44.8a
2009—2010								
深松+旋耕	W'0	2.55b	1.47b	57.64a	0.27b	10.4a	0.82c	31.94c
	W'3	3.02a	1.70a	56.19b	0.30a	10.0ab	1.02b	33.77b
	W'4	2.99a	1.53b	50.99c	0.28ab	9.4c	1.19a	39.61a
旋耕	W'0	2.26b	1.24b	54.69a	0.24b	10.6a	0.78c	34.74c
	W'3	2.65a	1.42a	53.56b	0.27a	10.3ab	0.96b	36.19b
	W'4	2.67a	1.26b	47.06c	0.25ab	9.2c	1.17a	43.76a

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5% 显著水平

2.3.3 开花后营养器官干物质再分配及其对籽粒贡献率

由表5可以看出,同一水分处理条件下,深松+旋耕的开花后干物质积累量和开花后干物质同化量对籽

表 5 不同处理对营养器官同化物再分配量和积累量的影响

Table 5 Effects of different treatments on photoassimilate translocation amount from vegetative organs to grain and its accumulation amount after anthesis

处理 Treatment	营养器官开花前 贮藏同化物转运量 Dry matter translocation amount after anthesis /(kg/hm ²)	开花后干物质积累量 Dry matter accumulation amount after anthesis /(kg/hm ²)	开花后干物质积累量 对籽粒产量的贡献率 Contribution of dry matter assimilation amount after anthesis to grain/%	营养器官开花前贮藏 同化物对籽粒产量的贡献率 Contribution of dry matter translocation amount after anthesis to grain/%	
2008—2009					
深松+旋耕	W0	2744b	4598d	62.6d	37.7a
	W1	3011a	5966c	66.5c	33.5b
	W2	2192c	6837b	75.7b	24.3c
	W3	1381d	8160a	85.5a	14.5d
	W4	2092c	6969b	76.9b	23.1c
旋耕	W0	3444a	3568d	50.9d	49.1a
	W1	3458a	4369c	55.8c	44.2b
	W2	3156b	5022b	61.4b	38.6c
	W3	2045c	6153a	75.1a	24.9d
	W4	3007b	5230b	63.5b	36.5c
2009—2010					
深松+旋耕	W'0	2758a	4905c	64.0b	36.0a
	W'3	1978b	7808a	79.8a	20.2b
	W'4	1957b	7271b	78.8a	21.2b
旋耕	W'0	3454a	3508b	50.4b	49.6a
	W'3	2306b	5956a	72.1a	27.9b
	W'4	2183b	5854a	72.8a	27.2b

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5% 显著水平

粒产量的贡献率高于旋耕处理;营养器官开花前贮藏同化物转运量和开花前贮藏同化物转运量对籽粒产量的贡献率低于旋耕处理。表明深松提高了开花后干物质的积累能力,增加了籽粒中来自开花后干物质的比例,这是深松+旋耕处理获得高产的生理基础。

2008—2009 生长季, W0 和 W1 的营养器官开花前贮藏同化物转运量及其对籽粒的贡献率显著高于 W2、W3 和 W4 处理; W2 与 W4 之间无显著差异,均高于 W3 处理; W3 开花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率显著高于其他处理; W4 与 W2 之间无显著差异,高于 W1 和 W0 处理。2009—2010 生长季,营养器官开花前贮藏同化物转运量及其对籽粒的贡献率为 $W'0 > W'3$ 、 $W'4$; 开花后干物质同化量对籽粒的贡献率为 $W'4$ 、 $W'3 > W'0$ 。表明全生育期不灌水有利于小麦开花前贮藏在营养器官的同化物向籽粒中转运,不利于开花后同化物的积累和转运。两年度在播种期、越冬期、拔节期、开花期土壤相对含水量分别为 85%、80%、75%、75% (W3) 和 85%、85%、75%、75% ($W'3$) 条件下,小麦开花后同化物的积累量和向籽粒中的转运量大,有利于产量的提高。

2.4 不同处理对籽粒产量和水分利用率的影响

由表 6 可以看出,不灌水条件下,深松+旋耕的水分利用率低于旋耕处理;灌水条件下,深松+旋耕的水分利用率高于旋耕处理。同一水分处理条件下,深松+旋耕的籽粒产量和灌溉效益均高于旋耕处理。表明 1a 深松对小麦后续 2a 仍能显著提高其水分利用率。

表 6 不同处理对籽粒产量和水分利用率的影响

Table 6 Effects of different treatments on grain yield and water use efficiency

处理 Treatment		籽粒产量 Grain yield /(kg/hm ²)	农田耗水量 Water consumption amount/mm	水分利用率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌溉效益 Irrigation benefit /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2008—2009					
深松+旋耕	W0	7341.4c	379.6d	19.3b	
	W1	8877.1b	448.7c	19.8ab	18.8a
	W2	8928.7b	462.3b	19.3b	14.6b
	W3	9541.0a	476.5b	20.0a	18.9a
	W4	9160.6ab	483.6a	18.9c	12.7c
旋耕	W0	7011.6c	356.6d	19.7a	
	W1	7627.3b	401.8c	19.0b	9.9b
	W2	7762.7b	420.4b	18.5c	8.5c
	W3	8197.6a	424.8b	19.3ab	12.7a
	W4	8037.6a	441.6a	18.2c	7.9d
2009—2010					
深松+旋耕	W'0	7663.4c	396.7c	19.3b	
	W'3	9786.8a	466.0b	21.0a	21.4a
	W'4	9259.3b	479.8a	19.3b	11.1b
旋耕	W'0	6962.2c	351.9c	19.8b	
	W'3	8262.1a	406.7b	20.3a	14.4a
	W'4	7936.6ab	426.2a	18.6c	7.7b

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5% 显著水平

2008—2009 生长季, W3 的籽粒产量高于 W2、W1 和 W0,与 W4 处理无显著差异,水分利用率高于 W2 和 W4,与 W1 处理无显著差异;灌溉效益在深松+旋耕条件下为 $W3$ 、 $W1 > W2 > W4$,在旋耕条件下为 $W3 > W1 > W2 > W4$ 。2009—2010 生长季, $W'3$ 的灌溉效益高于 $W'4$ 处理,水分利用率高于 $W'4$ 和 $W'0$ 处理。籽粒产量在深松+旋耕条件下为 $W'3 > W'4 > W'0$,在旋耕条件下为 $W'3$ 、 $W'4 > W'0$ 。表明 W3 和 $W'3$ 处理在两年度分别获得高的籽粒产量和灌溉效益及较高的水分利用率。

两年度结果示出,深松+旋耕条件下,播种期、越冬期、拔节期、开花期 0—140 cm 土层土壤相对含水量分

别达到 85%、80%、75%、75% 的 W3 处理和 85%、85%、75%、75% 的 W'3 处理籽粒产量和水分利用率较高,灌溉效益高于其他处理,是兼顾高产节水高效的最优处理。越冬期再增加补充灌水量的 W4 和 W'4 处理农田耗水量显著增高,水分利用率和灌溉效率均降低。

3 讨论

前人采用定量灌溉的方法对小麦节水高产的灌水次数和灌水量已进行过较多研究。在华北高产麦区,春灌 2 水,每次 75 mm,冬小麦籽粒产量为 7716.7 kg/hm²,水分利用率为 15.9 kg·hm⁻²·mm⁻¹,是最优的灌水模式^[21]。播种前、拔节和开花期各灌水 75 mm,最高产量可达 8240 kg/hm²,水分利用率为 17.43 kg·hm⁻²·mm⁻¹^[22];有研究表明,拔节和抽穗期每次灌水 60 mm,冬小麦籽粒产量可达 8139.6 kg/hm²,水分利用率为 17.6 kg·hm⁻²·mm⁻¹^[23]。本文采用测墒补灌的方法在深松+旋耕和旋耕两种耕作方式下的结果表明,2008—2009 生长季(小麦生育期降水量 140.6 mm)补灌水量为 116.6 mm,籽粒产量为 9541.0 kg/hm²,水分利用率为 20.0 kg·hm⁻²·mm⁻¹;2009—2010 生长季(小麦生育期降水量 163.2 mm)补灌水量为 111.3 mm,籽粒产量为 9786.8 kg/hm²,水分利用率为 21.0 kg·hm⁻²·mm⁻¹。两生长季各处理灌水量均低于 150 mm,籽粒产量达 7627.3—9786.8 kg/hm²,水分利用率达 18.2—21.0 kg·hm⁻²·mm⁻¹,说明测墒补灌在不同耕作方式下能够实现节水高产的目标。

土壤深层贮水具有较高的生物有效性,提高深层土壤水分的利用程度可显著提高水分利用率和灌溉效率^[6]。少免耕能够提高小麦生长发育时期的土壤含水量^[9, 24],但多年实施少免耕,造成土壤压实程度加重,影响作物根系发育^[25]。深松耕作对雨水的保蓄能力较强,能够提高土壤根系活力,并促进根系对土壤水分的利用^[26]。有研究认为,在华北平原,灌溉可以促进光合产物向小麦根系的分配,诱导根系发育和深扎,成熟期最大根深可达 2 m,有利于对土壤水分的高效利用^[27]。Liu 等^[28]研究亦表明,充足的底墒能够促进小麦根系对土壤水分的吸收,降低收获时土壤含水量,提高土壤水分利用率。本试验中,深松+旋耕方式下的 W3 和 W'3 处理成熟期 40—180 cm 土层的土壤含水量低于旋耕方式下的相应处理,这说明该处理开花至成熟期对土壤水的消耗量高。开花至成熟期是小麦耗水最多的时期,此时期小麦对土壤贮水的消耗量高,有利于获得高的水分利用率^[29]。

不同耕作栽培措施通过改善耕层土壤水分条件,提高小麦干物质积累能力。小麦连年采用旋耕整地会导致土壤耕层变浅、保肥保墒能力下降,不利于小麦的生长发育^[30],深松耕作下小麦开花后的绿叶面积和旗叶瞬间水分利用率较高,提高了作物群体和旗叶的光合生产能力,增加了后期的干物质积累量,有利于获得高的籽粒产量^[31-32]。灌水亦提高了小麦旗叶光合速率和干物质积累量^[33],而在某些生育时期水分适度亏缺,有利于同化物向籽粒转运,提高收获指数^[34-35]。有研究指出^[36],随着灌水量和灌水次数增加,开花前干物质向籽粒的转运率、转运量和对籽粒产量的贡献率均降低。本试验研究结果表明,深松有利于提高开花后干物质积累量和光合产物向籽粒的分配,使深松+旋耕处理开花后干物质积累量对籽粒的贡献率高于旋耕处理。对小麦播种期、越冬期、拔节期和开花期的 0—140 cm 土层土壤相对含水量进行调节,按照设计相对含水量进行测墒补灌,随着补灌水量增加,拔节至成熟期的干物质积累量增加。与其他处理相比较,深松+旋耕条件下的 W3 和 W'3 处理在各主要生育时期土壤含水量适宜,提高了开花后同化物的生产能力和向籽粒中的分配比例,有利于增加粒重,这是该处理获得高产的生理基础。

本试验中,在 1a 深松基础上连续 3a 旋耕下,播种期、越冬期、拔节期和开花期 0—140cm 土层平均土壤相对含水量,在 2008—2009 生长季分别为 85%、80%、75% 和 75%,2009—2010 生长季为 85%、85%、75% 和 75%,灌溉水用量较低,籽粒产量和水分利用率高,是节水高产的最优处理。

References:

- [1] Li A G, Hou Y S, Wall G W, Trent A, Kimball B A, Pinter P J Jr. Free-air CO₂ enrichment and drought stress effect on grain filling rate and duration in spring wheat. *Crop Science*, 2000, 40(5): 1263-1270.
- [2] Tan N T, Lin Q, Li L Y, Liu Y G, Zhang Y M. Effect of limited irrigation on light-response of flag leaves and grain yield in dry-land winter wheat

- at filling stage. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(4): 145-151.
- [3] Zhang B C, Li F M, Huang G B, Cheng Z Y, Zhang Y H. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1): 28-42.
- [4] Zheng C Y, Yu Z W, Ma X H, Wang X Z, Bai H L. Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(8): 1450-1458.
- [5] Zhang Z X, Yu G R. Effects of irrigation scheduling on development and water use efficiency in winter wheat. *Journal Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 1-4.
- [6] Liu G S, Guo A H, Ren S X, An S Q, Lin R N, Zhao H R. The effect of limited water supply on root growth and soil water use of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2342-2352.
- [7] Gao H W, Li H W, Chen J D. Sustainable mechanized dry land farming research in Northern China // ISTRO International Conference. Fort Wort, 2000; 2-5.
- [8] Li Y J, Wu J Z, Huang M, Yao Y Q, Zhang C J, Cai D X, Jin K. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 44-48.
- [9] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, Cai D X, Lu J J, Jiang G H, Huang J, Gao J, Hartmann R, Gabriels D. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 307-314.
- [10] Fabrizzi K P, García F O, Costa J L, Picone L I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81(1): 57-69.
- [11] Borghai A M, Taghinejad J, Minaei S, Karimi M, Varnamkhasti M G. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest of Iran. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2008, 10: 120-123.
- [12] Mohanty M, Bandyopadhyay K K, Painuli D K, Ghosh P K, Misra A K, Hati K M. Water transmission characteristics of a vertisol and water use efficiency of rainfed soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under subsoiling and manuring. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 420-428.
- [13] Han B, Li Z J, Wang Y, Ning T Y, Zheng Y H, Shi Z Q. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 48-53.
- [14] Cui S M. Effects of Tillage Methods and Soil Moisture on Grain yield and Water use Characteristics and its Physiological Basis in Wheat [D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2009.
- [15] Du T S, Kang S Z, Wang Z C, Wang F, Yang X Y, Su X L. Responses of cotton growth, yield, and water use efficiency to alternate furrow irrigation. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(12): 1982-1990.
- [16] Shan L, Kang S Z, Wu P T. *Water Saving Agriculture in China*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2004: 229-230.
- [17] Liu Z J, Li B P, Li Y H, Cui Y L. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(4): 58-63.
- [18] Payero J O, Tarkalson D D, Irmak S, Davison D, Petersen J L. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(10): 1387-1397.
- [19] Wang J S, Xu Z K, Yao J W. Analysis of food throughput per unit water use. *Advances Water Science*, 1999, 10(4): 429-434.
- [20] Jiang D, Xie Z J, Cao W X, Dai T B, Jing Q. Effects of post-anthesis drought and waterlogging on photosynthetic characteristics, assimilates transportation in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(2): 175-182.
- [21] Zhang Z X, Wu W L. Optimal irrigation regime for yield improving and water saving in winter wheat. *Irrigation and Drainage*, 2001, 20(3): 20-24.
- [22] Li J M, Inanaga S, Li Z H, Eneji A E. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(1): 8-23.
- [23] Han H F, Li Q Q, Dong B D, Liu M Y. Effects of irrigation frequency and stages on grain yield and quality characteristics of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1548-1555.
- [24] Baumhardt R L, Jones O R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorgh for a clay loam in Texas. *Soil and Tillage Research*, 2002, 68(2): 71-82.
- [25] Du B, Li W Y, Deng J, Liao Z X. Research on surface tillage in conservation tillage. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(4): 65-67.
- [26] Qin H L, Gao W S, Ma Y C, Ma L, Yin C M. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78-85.
- [27] Hu M Y, Zhang Z B, Xu P, Dong B D, Li W Q, Li J J. Relationship of water use efficiency with photoassimilate accumulation and transport in wheat under deficit irrigation. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1884-1891.
- [28] Liu G S, Guo A H, An S Q, Lü H Q, Bai Y M, Wen M. Effect of available soil water at planting on growth of root, canopy and soil water use of winter wheat in field. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 149-154.
- [29] Yang X Y, Yu Z W, Xu Z Z. Effects of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen accumulation and allocation in wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 846-853.
- [30] Ji X Y, Wang L P, Shen C X. Influences investigation and analysis of long-term rotary tillage on wheat growth and yield in dryland. *Seed Industry*

Guide, 2010, (8): 15-16.

- [31] Huang M, Wu J Z, Li Y J, Yao Y Q, Zhang C J, Cai D X, Jin K. Effects of tillage pattern on the flag leaf senescence and grain yield of winter wheat under dry farming. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1355-1361.
- [32] Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, Wang W, Ding R X, Nie J F, Li Y P. Effects of rotational tillage on flag leaf photosynthetic characteristics and yield after anthesis of winter wheat in arid areas of southern Ningxia. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(15): 3108-3117.
- [33] Xu Z Z, Yu Z W. Nitrogen metabolism in flag leaf and grain of wheat in response to irrigation regimes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(1): 118-126.
- [34] Yang J C, Zhang J H, Huang Z L, Zhu Q S, Wang L. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. *Crop Science*, 2000, 40: 1645-1655.
- [35] Kang S Z, Zhang L, Liang Y L, Hu Y T, Cai H J, Gu B J. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2002, 55(3): 203-216.
- [36] Xue X Z, Wang Z M. Influence of irrigation on growth and evapotranspiration of wheat under whole fertilization before sowing. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(2): 141-146.

参考文献:

- [2] 谭念童, 林琪, 李玲燕, 刘义国, 张玉梅. 限量补灌对旱地冬小麦灌浆期旗叶光响应及产量的影响. *华北农学报*, 2010, 25(4): 145-151.
- [4] 郑成岩, 于振文, 马兴华, 王西芝, 白洪立. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配. *作物学报*, 2008, 34(8): 1450-1458.
- [5] 张忠学, 于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 1-4.
- [6] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 安顺清, 林日暖, 赵花荣. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2342-2352.
- [8] 李友军, 吴金芝, 黄明, 姚宇卿, 张灿军, 蔡典雄, 金轲. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 44-48.
- [13] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 宁堂原, 郑延海, 史忠强. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48-53.
- [14] 崔世明. 耕作方式和土壤水分对小麦产量和水分利用特性的影响及其生理基础 [D]. 山东: 山东农业大学, 2009.
- [15] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 王锋, 杨秀英, 苏兴礼. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应. *作物学报*, 2007, 33(12): 1982-1990.
- [16] 山仑, 康绍忠, 吴普特. 中国节水农业. 北京: 中国农业出版社, 2004: 229-230.
- [17] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 崔远来. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 58-63.
- [19] 王建生, 徐子恺, 姚建文. 单位水量粮食生产能力分析. *水科学进展*, 1999, 10(4): 429-434.
- [20] 姜东, 谢祝捷, 曹卫星, 戴廷波, 荆奇. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响. *作物学报*, 2004, 30(2): 175-182.
- [21] 张忠学, 吴文良. 冬小麦节水增产灌溉模式试验研究. *灌溉排水*, 2001, 20(3): 20-24.
- [23] 韩惠芳, 李全起, 董宝娣, 刘孟雨. 灌溉频次和时期对冬小麦籽粒产量及品质特性的影响. *生态学报*, 2010, 30(6): 1548-1555.
- [25] 杜兵, 李问盈, 邓健, 廖植樨. 保护性耕作表土作业的田间试验研究. *中国农业大学学报*, 2000, 5(4): 65-67.
- [26] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 马丽, 尹春梅. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 78-85.
- [27] 胡梦芸, 张正斌, 徐萍, 董宝娣, 李魏强, 李景娟. 亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究. *作物学报*, 2007, 33(11): 1884-1891.
- [29] 杨晓亚, 于振文, 许振柱. 灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响. *生态学报*, 2009, 29(2): 846-853.
- [30] 姬相云, 王莉萍, 申春晓. 连年旋耕整地对旱地小麦生长发育及产量影响的调查分析. *种业导刊*, 2010, (8): 15-16.
- [31] 黄明, 吴金芝, 李友军, 姚宇卿, 张灿军, 蔡典雄, 金轲. 不同耕作方式对旱作冬小麦旗叶衰老和籽粒产量的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1355-1361.
- [32] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 王维, 丁瑞霞, 聂俊峰, 李永平. 轮耕对宁夏旱区冬小麦花后旗叶光合性能及产量的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(15): 3108-3117.
- [36] 薛绪掌, 王志敏. 全量基肥不同灌溉制度对小麦生长发育和耗水的影响. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(2): 141-146.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyang, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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

本期责任副主编 陈利顶

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 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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: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 90.00 元