

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第7期 Vol.34 No.7 **2014**

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 34 卷 第 7 期

2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 青藏高原东北部 5000 年来气候变化与若尔盖湿地历史生态学研究进展 何奕忻, 吴 宁, 朱求安, 等 (1615)
- 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素 阿米娜木·艾力, 常顺利, 张毓涛, 等 (1626)

个体与基础生态

- 小兴安岭红松日径向变化及其对气象因子的响应 李兴欢, 刘瑞鹏, 毛子军, 等 (1635)
- 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 等 (1645)
- 庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征 白秀梅, 韩有志, 郭汉清 (1654)
- 思茅松天然林树冠结构模型 欧光龙, 肖义发, 王俊峰, 等 (1663)
- 镁缺乏和过量胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐, 黄 翼, 彭良志, 等 (1672)
- 斑块生境中食果鸟类对南方红豆杉种子的取食和传播 李 宁, 王 征, 鲁长虎, 等 (1681)
- 重金属铅与两种淡水藻的相互作用 刘 璐, 闫 浩, 李 诚, 等 (1690)
- 刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构周年变化 姜森颖, 周一兵, 唐伯平, 等 (1698)
- 控(微囊)藻鲢、鳙排泄物光能与生长活性 王银平, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等 (1707)
- 五爪金龙中香豆素类物质含量及其对福寿螺、水稻和稗草的影响 犹昌艳, 杨 宇, 胡 飞, 等 (1716)

种群、群落和生态系统

- 西双版纳国家级自然保护区勐腊子保护区亚洲象种群和栖息地评价 林 柳, 金延飞, 陈德坤, 等 (1725)
- 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化 李 凡, 徐炳庆, 马元庆, 等 (1736)
- 长期不同施肥方式对麦田杂草群落的影响 蒋 敏, 沈明星, 沈新平, 等 (1746)
- 极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程 周 宏, 张恒嘉, 莫 非, 等 (1757)

景观、区域和全球生态

- 流域景观格局变化对洪枯径流影响的 SWAT 模型模拟分析 林炳青, 陈兴伟, 陈 莹, 等 (1772)
- 近 20 年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征 徐维新, 辛元春, 张 娟, 等 (1781)
- 丽江城市不同区域景观美学 郭先华, 赵千钧, 崔胜辉, 等 (1794)
- 珠三角河网水域栅藻的时空分布特征 王 超, 李新辉, 赖子尼, 等 (1800)
- 博斯腾湖细菌丰度时空分布及其与环境因子的关系 王博雯, 汤祥明, 高 光, 等 (1812)
- 遗传算法支持下土地利用空间分形特征尺度域的识别 吴 浩, 李 岩, 史文中, 等 (1822)
- 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应 靳 翔, 徐 庆, 刘世荣, 等 (1831)

基于 ESDA 的西北太平洋柔鱼资源空间热点区域及其变动研究 冯永玖,陈新军,杨铭霞,等 (1841)

城乡与社会生态

基于居民生态认知的非使用价值支付意愿空间分异研究——以三江平原湿地为例.....

..... 高 琴,敖长林,陈红光,等 (1851)

浑河河水及其沿岸地下水污染特征 崔 健,都基众,王晓光 (1860)

社会生态系统及脆弱性驱动机制分析 余中元,李 波,张新时 (1870)

研究简报

等渗 NaCl 和 Ca(NO₃)₂胁迫对黄瓜幼苗生长和生理特性的影响 周 珩,郭世荣,邵慧娟,等 (1880)

专家观点

关于“生态保护和建设”名称和内涵的探讨 沈国舫 (1891)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说: 红豆杉人工林——红豆杉为常绿针叶乔木,树高可达 25m,属国家一级保护植物。红豆杉中含有的紫杉醇,具有独特的抗癌机制和较高的抗癌活性,能阻止癌细胞的繁殖、抑制肿瘤细胞的迁移,是世界公认的抗癌药。红豆杉在我国共有 4 个种和 1 个变种,即云南红豆杉、西藏红豆杉、东北红豆杉、中国红豆杉和南方红豆杉(变种)。由于天然红豆杉稀缺,国家严禁采伐利用,因而我国南方很多地方都采取人工种植的方法生产利用。人工种植的南方红豆杉在南方山区多呈斑块状分布,斑块生境中鸟类对红豆杉种子的传播有重要的影响。

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/stxb201306101580

周宏, 张恒嘉, 莫非, 赵鸿, 王润元, 吴珊, 邓浩亮, Asfa Batool, Baoluo Ma, 熊友才. 极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程. 生态学报, 2014, 34(7): 1757-1771.

Zhou H, Zhang H J, Mo F, Asfa B, Zhao H, Wang R Y, Wu S, Deng H L, Baoluo M, Xiong Y C. Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1757-1771.

极端干旱条件下燕麦垄沟覆盖系统水生态过程

周 宏^{1,2,4}, 张恒嘉^{1,4,*}, 莫 非², 赵 鸿^{2,3}, 王润元³, 吴 珊^{1,2,4},
邓浩亮^{1,2,4}, Asfa Batool², Baoluo Ma⁵, 熊友才^{2,*}

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 兰州大学生命科学学院干旱农业生态研究所/草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省气候变化与减灾重点(开放)实验室, 兰州 730020;
4. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070; 5. 加拿大农业部 ECORC 研究中心, 渥太华 K1A 0C6 加拿大)

摘要: 围绕极端气候条件下沟垄沟覆盖系统水文过程和水生产力变化问题开展两年的大田试验研究。以裸燕麦坝莪 3 号品种为材料, 于 2010 年和 2011 年在甘肃定西进行, 以充分灌溉为对照组, 设置平地无种植、垄沟无覆膜种植、垄沟覆膜种植、裸地 4 个处理(此 4 个处理均无灌溉), 测定生育期降雨、气温、0—140 cm 土壤剖面水分变化、作物生长和产量等指标。结果表明, 2010 年和 2011 年分别为阶段性极端干旱和全生育期极端干旱两个类型, 均导致所有处理组中土壤剖面 60—100 cm 的“土壤干层”现象, 垄沟覆膜处理对“土壤干层”现象具有显著的缓解效应。与对照组相比, 垄沟覆膜处理显著促进了收获期土壤剖面蓄水量的回升, 其贮水量分别提高了 41.2 mm(2010 年)和 22.4 mm(2011 年), 全生育期水分利用效率和水生产力分别提高了 1.7、0.4 kg·hm⁻²·mm⁻¹(2010 年)和 6.5、9.8 kg·hm⁻²·mm⁻¹(2011 年)。另外, 垄沟覆膜处理组的地上生物量比对照组降低了 30.5%(2010 年)和 67.42%(2011 年), 但收获指数较对照分别提高了 33.4%(2010 年)和 55.6%(2011 年)。研究表明, 垄沟覆膜处理促进了降水向土壤水和作物水的转化效率, 显著地缓解了作物水分供需矛盾, 是应对极端气候变化的重要生态策略。

关键词: 极端干旱; 垄沟覆膜系统; 土壤水分; 水生态过程; 燕麦

Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario

ZHOU Hong^{1,2,4}, ZHANG Hengjia^{1,4,*}, MO Fei², Asfa Batool², ZHAO Hong^{2,3}, Wang Runyuan³, WU Shan^{1,2,4},
DENG Haoliang^{1,2,4}, Baoluo Ma⁵, XIONG Youcai^{2,*}

1 College of Engineering Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid climate Change and disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China

4 Gansu Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

5 Eastern Cereal and Oilseed Research Center, Agriculture and Agri-Food, Ottawa 1A 0C6, Ontario, Canada

Abstract: Extreme arid climate plays a critical role in affecting farmland hydrological process and crop yield in semiarid rainfed agricultural area. However, relevant field studies on this issue are not enough documented and the related solution to this issue is so far not well defined. Since 1990s, micro-field rain-harvesting farming technology has been developed and

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106029-2); 国家重大基础研究计划 973 项目(2009CB825101); 国家科技支撑计划(31070372); 甘肃省自然科学基金(1107RJZA124); 甘肃省科学院开发与应用基金项目(2012JK-03); 教育部直属高校海外名师项目(Ms2011LZDX059)

收稿日期: 2012-06-10; 修订日期: 2013-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangbuchong@hotmail.com; xiongye@lzu.edu.cn

extended to a large area in semiarid Loess Plateau of northwest China, however, its functional role as a solution to cope with extreme climate change is not well recognized. In this study, we designed a two-year field experiment to address the issues of field water productivity and hydrological processes by applying ridge and furrow system under the condition of extreme weather. Oat cultivar, *Bayou 3* was used as research material in this study. Field experiment was conducted at the Arid Meteorology and Ecological Experimental Station, Lanzhou Institute of Arid Meteorology of China Meteorological Administration (Dingxi County, Gansu Province) in both years of 2010 and 2011, respectively. Five farming treatments including micro-field rain-harvesting mulching technology were designed as follows: control with full irrigation, flat planting, furrow and ridge without mulching planting, furrow and ridge with film mulching planting and bare field without irrigation, respectively. Some critical parameters were systematically measured and recorded including rainfall amount, soil moisture in 0—140cm soil profile, crop growth and yield formation during whole growth period. Least significant difference (LSD) was used to detect mean differences between treatments ($P < 0.05$). The results showed that year 2010 and 2011 belonged to two extreme climate types, i.e. phased extreme drought and whole extreme drought within the growth period. For both years, extreme drought climate led to “dried soil layer” phenomenon in the soil profile of 60—100cm in all treatment groups. However, the treatment of ridge and furrow with plastic mulching (RFM) was observed to have a significantly positive effect on mitigating the occurrence of “dried soil layer”. The RFM treatment resulted in a significant overall upturn in water storage amount in soil bulk at the harvesting period, with the increases in soil water storage by 41.2 mm in 2010 and 22.4 mm in 2011 in comparison with that of control group, respectively. In addition, water use efficiency and water productivity of RFM treatment were increased by $1.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $0.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ in 2010 and $6.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ and $9.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ in 2011 in comparison with those of control group respectively. The performance of RFM treatment was significantly superior to that of other treatments. It showed that RFM technology significantly enhanced the transformation efficiency from natural rainwater to soil water and crop water. On the other hand, above-ground biomass in RFM group was declined by 30.5% in 2010 and 67.42% in 2011 compared to that of control group, but the harvest index of RFM group was increased by 33.4% in 2010 and 55.6% in 2011 in comparison with that of control group, respectively. Furthermore, RFM treatment played a positive role in optimizing architecture traits of spike, increasing seed weight, kernels per spike and grain weight per spike. Our study indicated that the RFM system can optimize water resources distribution, mitigate temporal and spatial contradiction between water supply and water demand for oat crop production, and transform more photosynthates from vegetative growth to reproductive growth. In conclusion, the RFM system displayed great potential to relieve the occurrence of dry soil layer and improve water field productivity in rainfed oat field in 2010 and 2011. It can be argued that the RFM system could serve as an important ecological strategy in response to extreme climate events and improve food security in arid region.

Key Words: extreme climate; ridge and furrow with film mulching (RFPM); soil moisture; ecological processes; Oat (*Avena sativa* L)

极端气候事件是区域范围内某一特定时期发生频率较低,但作用强度大、并对自然过程和人类生产活动产生重要影响的天气气候事件^[1],包括极端气温、极限降雨、干热风 and 冰雹等事件^[2-3]。其中,极端气温和降雨具有高度的不可预测性,已成为影响旱区粮食安全和生态系统管理的主要生态因子^[4]。自 20 世纪 80 年代以来,我国北方极端气候频发,表现为短期内连续暴雨或者长期极少降雨两种特征,其

中后者对农业生产影响面更大^[5-6]。极端气候事件增多加剧了农业生产的波动性,使农田生产系统的光、温、水、土、气等要素发生剧烈变化,对作物生长、水分利用和籽粒产量带来重大影响。在全球变化背景下,主粮作物包括小麦、玉米和水稻在内的产量受极端气候事件影响显著,造成粮食安全危机。在生态脆弱的黄土高原,上述危害更趋严重,探寻减缓和适应气候变化的策略已成为农业生态学领域的核心

内容^[7-8]。

水资源短缺、降雨少且波动性大是限制雨养农业区粮食产量提高和可持续性管理的瓶颈^[9]，“卡脖子旱”问题十分突出。地膜覆盖自从 1978 年引入中国以来，经历了多次更新换代，并得到大面积推广和应用^[10-11]。最近 10 年，垄沟覆膜微集雨栽培技术得到长足发展，因其集雨、保墒、抑蒸、增温、减少水土流失等优点，被广泛地应用于没有灌溉条件和春季土壤积温不足的半干旱和半湿润偏旱地区^[12-18]。较传统平作耕作技术，垄沟覆膜技术能更加有效地抑制无效蒸发、提高降雨向土壤水和作物水的转化效率，解决作物水温供需错位矛盾，尤其是卡脖子旱问题，显著提高作物产量和水分利用效率^[19-24]，为旱区农田水分生产力提升和农户生计改善提供了强大的技术支撑^[25-26]。

然而，有报道指出垄沟覆膜在获得显著的增产效应同时，也会带来负面影响，包括生长后期的土壤干层问题，通常在土壤 1 m 深度以下出现干燥化现象^[26,27-29]。那么，土壤干层问题究竟是垄沟覆膜引起的，还是作物本身在生长后期对土壤深处的水分过度利用所致？前期研究主要集中在丰水或者次丰水年份，在极端干旱条件下的田间试验还未见报道。更进一步地，垄沟覆膜条件下的水生产力和对天然降雨的利用效率如何？它们与极端干旱条件下土壤干层现象有正协同还是负协同效应？对上述问题的回答具有很重要的理论意义和实践价值。另一方面，在正常年份垄沟覆膜技术能够增加干物质积累，相应地提高籽粒产量，通常与单位面积上成穗数、穗粒数和粒重显著相关^[30-32]。但是在极端干旱气候下，生物量的积累与产量如何分配？产量构成因子将如何变异？相关研究的报道较少，因此通过开展于大田试验，研究极端气候条件下的作物产量与生物量积累，产量构成要素的变化特性等关系，对提高旱区产量具有重要的意义。

燕麦(*Avena sativa* L.)是目前最具潜力的成为新一代主粮的栽培作物，可在多种土壤条件下种植^[33]。它具有抗旱、耐寒、耐瘠的特性^[34]，特别适宜于西北干旱、高寒、贫瘠的黄土丘陵沟壑区^[35]。在黄土高原半干旱冷凉地区，昼夜温差大、土壤质地偏砂，非常适合于燕麦生产。裸燕麦的蛋白质和脂肪含量分别高达 15% 和 8.5%，分别是面粉和大米的 2

倍和 4—7 倍。由于燕麦脂肪中的主要成份是不饱和脂肪酸，其中具有降脂功效的亚油酸又占 38.1%—52%，高居九种主要粮食作物之首^[36-37]，因此它又是不可多得的功能保健食品^[38-40]，具有广阔的市场潜力。另一方面，它既有野生性又有栽培性，粮草兼顾，有利于退耕还草，改善种植结构和生态环境，促进农牧业可持续发展。在全球气候变化下，黄土高原生态问题和粮食问题日趋突出，燕麦作物具有重要的应用价值。

目前极端气候对农业生态系统的影响研究主要集中在气候变暖导致高温天气^[41-42]、暴雨事件^[43]、洪涝、低温霜冻等方面^[44-45]，且主要在大的时间和区域尺度上，对农田尺度上降雨格局发生改变导致极端干旱情景下的相关研究比较少见。垄沟覆盖技术作为一项重要的应对全球变化的耕作技术和应对措施，那么在应对极端气候情景有何种效果？降水、土壤水和作物水的转化效率如何？对土壤干层现象是正协同还是负协同效应？田间水分生产力和作物产量形成规律如何？对这些问题的回答首先必须建立在垄沟覆膜系统土壤水文过程和水生产力的基础研究上。本研究以燕麦为材料，以平地栽培充分供水为对照组，设置平地旱作栽培、垄沟无覆膜栽培、垄沟覆膜栽培和平地无栽培等 4 个处理组，通过探索极端气候背景下作物生长和水生态过程，探寻垄沟覆膜微集雨栽培技术区域适应性特征，为旱区农业和水资源可持续管理提供科学依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

大田试验在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验站(104°37'E, 35°35'N)进行。试验站海拔为 1896.7 m，地处欧亚大陆腹地，是我国干旱气候区和半湿润气候区的重要气候过渡带。它既是气候变化的敏感区，又是生态环境比较脆弱的地带。其特点是光能较多，但雨热不同季，降水少且主要集中在 7—10 月，占年降水量的 86.9%。该地区气候干燥，年日照时间为 2433 h，年平均气温 6.7℃，多年平均降水量为 381.7 mm，年蒸发量 1531 mm，平均无霜期 140 d，气候特点在黄土高原雨养农业区具有广泛的代表性和典型性。另外，该地区水土流失严重，生产力水平较低，土壤肥

力中等,表层土壤为重壤土,地下水埋深大于 40 m,1 m 深土壤剖面平均容重为 1.38 g/cm^3 。pH 值 8.36,表层 0—40 cm 平均土壤有机质 11.01 g/kg ,全氮 0.73 g/kg ,全磷 1.77 g/kg ,田间持水量的质量含水量为 25.6%,凋萎系数为 6.7%。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理组,其中种植处理 4 个,1 个裸地无种植:

- 1) 对照组 (CK),平地种植充分供水。
- 2) 垄沟无覆膜种植 (RF),垄沟比 40 cm : 40 cm,无灌溉处理。
- 3) 垄沟覆膜种植 (RFM),垄沟比 40 cm : 40 cm,无灌溉处理。
- 4) 传统平地种植 (FP),无灌溉处理。
- 5) 裸地 (BF),无种植无灌溉处理。

充分供水具体方法是在燕麦的苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期分别进行充分灌溉,灌水的下线指标为田间持水量的 65%,这个值一般是高于凋萎系数,便于被植物所吸收。为降低大气蒸发而产生的水分损失,灌水选择在傍晚进行均匀的喷灌。在每次灌水前通过土钻取土、烘箱烘干法测定灌水前的土壤质量含水量,然后根据以下表达式确定具体灌水量

$$M = 36rH(\theta_{\max} - \theta_0) \frac{1}{r_{\text{水}}} \quad (1)$$

式中, M 为灌水量 (m^3); r 为以 20 cm 梯度,100 cm 内不同剖面土壤容 (g/m^3); H 为计划湿润层深度 (cm),依据作物的根系生长繁殖,每个生育期采取不同的湿润层 (苗期 20 cm;分蘖期 40 cm,拔节期 60 cm,抽穗期 80 cm,灌浆期 80 cm); θ_{\max} 为灌水量下线 (%); θ_0 灌水前土壤含水量 (%); $r_{\text{水}}$ 为水容重 (kg/m^3)。试验区域不考虑地下水补给对灌溉的影响。

所有垄沟栽培模式的设计垄宽 40 cm,垄高 20 cm,具体如图 1 和图 2 所表示。

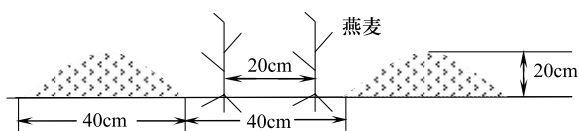


图 1 垄沟无覆盖种植

Fig.1 The ridge and furrow without mulching planting

以燕麦“坝苡 3 号”为材料,地膜材质为白色聚

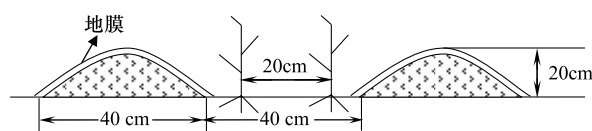


图 2 垄沟地膜覆盖种植

Fig.2 The ridge and furrow with film mulching planting

乙烯,小区面积为 22 m^2 ,且每个小区的播种密度相同。播前将试验小区耕作层土壤进行 30 cm 深翻耕,同时施入底肥尿素 270 kg/hm^2 ,硫酸钾 105 kg/hm^2 ,过磷酸钙 750 kg/hm^2 ,每个处理设置 3 个重复,按随机因子裂区排列。

1.3 测定的项目与方法

1.3.1 土壤水分

土壤水分采用烘干法测定。播种前和收获后取样深度为 140 cm,以 20 cm 为梯度进行采样测定。生育期间取样深度为 100 cm,同样采用 20 cm 为梯度进行采样,用土钻取样铝盒封装带回实验室测定,用烘箱在 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下烘至恒重 (约 8 h),然后计算土壤重量含水量。其中,土壤贮水量、土壤贮水量变化及耗水量的计算公式为:

土壤贮水量 = 土层厚度 \times 土壤含水量 \times 土壤容重 (2)

土壤贮水量变化 = 收获时土壤贮水量 - 播种时土壤贮水量 (3)

耗水量 = 生育期总有效降雨量 + (播种时土壤贮水量 - 收获时土壤贮水量) (4)

式中,土层厚度为 (mm);土壤含水率为 (%);土壤容重为 (g/m^3);降雨量与土壤贮水量单位一致,均为 (mm)。

$$WUE = Y / SWC \quad (5)$$

式中, WUE 为土壤水生产力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); Y 为籽粒产量 (kg/hm^2); SWC 为土壤耗水量 (mm)。

$$WP = Y / P \quad (6)$$

式中, WP 为大气降水生产力 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); P 为生育期的有效降雨量 (mm)。

1.3.2 出苗率

播种后定期观察出苗并记录,出苗以第 1 片叶伸出叶鞘 2 cm 为准,直至燕麦达到生物学性状“三叶一心”前,以最后一次观察结果为准,统计出实际出苗数,最后根据 3 次重复计算实际出苗率。

出苗率 (%) = 实际出苗数 / 实际播种数量 $\times 100\%$

1.3.3 干物质

分别在燕麦的苗期、拔节期、分蘖期、孕穗期、灌

浆期、每个小区随机选取 10 株,带回室内晾干除去根部,包装后放在 105 ℃ 的恒温箱内烘 30 min 杀青,然后将温度调至到 80 ℃,继续烘干至恒重测定干重。对于成熟期地上干物质的测定,人工在每个小区随机收取 1 m²,除去地下根部,保留完整的地上部分。首先在自然条件下风干除去一定的水分,然后用烘箱在 80 ℃ 恒温烘干至恒重。各小区单独称取重量,依据小区的面积折合为公顷数。

1.3.4 产量及构成因子

在燕麦成熟期,每个小区随机选取 3 m²,人工收割,晒干至恒重后脱粒,然后将脱粒后的籽粒在自然条件下风干除去杂物,考种办法同生物量测定方法一致。计算 3 次重复产量的平均值,最后折合为公顷数。对于产量构成要素测定,每个小区随机取 10 株带回室内进行考种,测定分蘖数、穗粒数、穗粒重和千粒重等指标。

1.4 数据的统计与分析

实验数据采用 Excel 2010 进行数据的基础整理,并用 Origin 8.0 软件作图,所有数据的显著性、误差分析由 SPSS 17.0 软件处理得到,而处理之间的各项指标均由单因素 SLD 分析、比较,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$,各图表中的数据均为平均值。

2 结果与分析

2.1 研究地点降雨分析及极端气候界定

按联合国环境规划署对极端气候界定标准,某一时段降水量距平百分量 -20%—-39% 定为干旱, -40%—-59% 为大旱, $\leq -60\%$ 为重旱^[46]。因此本文将 60% 定义为极值点来判断干旱作为极端气候的标准。在本研究的试验点,2010 年和 2011 年的降雨量均显著低于过去 30a 的平均值,尤其是 2011 年,总降雨量仅为多年均值的 22.58%,且在作物的 3 个生长繁殖阶段:建苗期、生殖繁育、营养繁殖都发生了严重的干旱,在拔节期更为凸显,降雨量仅仅为 2.6 mm,而多年的均值为 55.6 mm。2010 年降雨量尽管比 2011 年高,但是在生殖繁殖后期和营养繁殖前期,发生了极端干旱现象,降雨量仅为 16.0 mm,仅占全生育期的 7.62%,与多年均值 83.6 mm 相比,具有显著性的差异(表 1)。虽然两年发生极端干旱的时间段有所不同,且以小于距平值的 60% 为判断标准,将 2011 年界定为全生育期持续极端干旱,简称为全生育期极端干旱年份;2010 年界定为生育中后期阶段性极端干旱,简称为阶段性极端干旱。

表 1 2010—2011 年全生育期降雨量分布极其极端干旱的发生时段

Table 1 Rainfall distribution in growing season and the time during extreme droughts in the 2010 and 2011

年份 Year	总降雨 Rainfall /mm	统计指标 Statistical index	建苗 Seeding formation	生殖繁殖 Generative reproduction			营养繁殖 Vegetative reproduction	
			播种-苗期 Sowing- seeding	苗期-分蘖 Seeding- tillering	分蘖-拔节 Tillering- jointing	拔节-抽穗 Jointing- heading	抽穗-灌浆 Heading- filling	灌浆-成熟 Filling- maturity
2010	209.9	分布时间段/(月-日)	4-8—5-17	5-17—5-29	5-29—6-15	6-15—7-1	7-1—7-15	7-15—8-15
		降雨/mm	40.8	42	20.6	33	16	57.4
		分布比例/%	19.44	20.01	9.81	15.72	7.62	27.35
		距平值/mm	16.7	-4.5	-35	-39.2	-67.6	10.7
		距平比例/%	69.29	-9.68	-62.95	-54.29	-80.86	22.91
		是否 $\leq -60\%$	未达极值	未达极值	破极值	接近极值	破极值	未达极值
2011	74.2	分布时间段/(月-日)	4-10—6-10	6-10—6-23	6-23—7-10	7-10—7-25	7-25—8-12	8-12—9-11
		降雨/mm	16.9	9.3	2.6	9.5	13.5	20.5
		分布比例/%	22.78	12.53	3.50	12.80	18.19	27.63
		距平值/mm	-7.2	-37.2	-53	-62.7	-70.1	-26.2
		距平比例/%	-29.88	-80.00	-95.32	-86.84	-83.85	-56.10
		是否 $\leq -60\%$	未达极值	破极值	破极值	破极值	破极值	接近极值
过去 30a Over the past 30a	328.6	分布时间段/(月-日)	4-5—5-15	5-15—5-30	5-30—6-15	6-15—7-0	7-0—15	7-15—8-15
		降雨/mm	24.1	46.5	55.6	72.2	83.6	46.7
		分布比例/%	7.33	14.15	16.92	21.97	25.44	14.21

2.2 垄沟栽培模式对出苗的影响

种子出苗率低、出苗均匀度差,最终都会直接导致作物产量下降。通过分析发现 2010 年和 2011 两年各处理之间出苗率出现显著 ($P<0.05$) 的差异。极端性极端干旱的 2010 年,处理 RFM 较 CK 提高了 17.03%,RF、FP 较 CK 分别降低了 11.28%、3.71%。全生育期极端干旱的 2011 年,各处理的出苗率受到了严重的影响,但总体趋势仍然和 2010 年相似,表现为 RFM>RF>FP,与 CK 相比,处理 RFM、RF、FP 的出苗率分别降低了 76.46%、89.52%、89.67% (图 3)。在两个极端气候年份下,2010 年由于其极端干旱发生在生育后期,出苗率并没有受到太大影响,而 2011 年全生育期的极端干旱使播前土壤储水和建苗阶段土壤的供水量受到了严重的亏缺,导致出苗率严重降低。但是垄沟覆膜栽培其特有的集雨、增温效应,出苗率仍达到了 15%,较 RF、FP 相比,其提高了 55.4%、56.1%,RF 与 FP 之间没有显著差异。

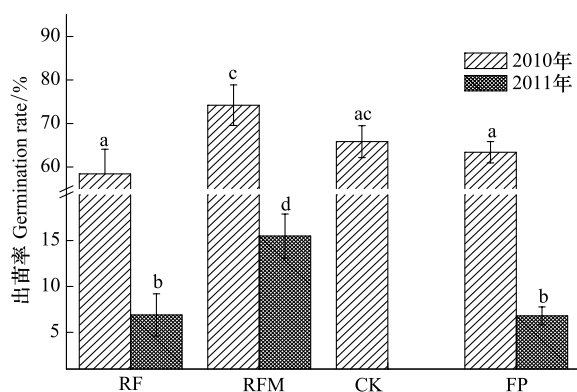


图 3 不同处理燕麦出苗率

Fig.3 The germination rate of oat under different treatments

不同字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异 ($P<0.05$)

2.3 垄沟栽培对全生育期生物量变化的影响

两个极端气候类型下,地上生物量积累随生育期动态变化规律出现了较大差异。生育后期极端干旱的 2010 年各处理变化表明:处理 FP、RF 从分蘖期干重一直处于上升阶段,随后逐渐开始下降,到播种后 90 d 左右停止变化,趋于稳定,呈现单峰型变化。处理 RFM 达到稳定的时间相对于滞后几天。收获期 RFM、RF、FP 单株干物质分别为 3.61、2.65 g、2.82 g,比对照依次降低了 21.22%、42.01%、38.29%,但是处理 RFM 显著高于 RF、FP,分别比其提高了 26.59%、21.88%。且从全生育期地上干物质变化可以看到,处理 RFM 达到峰值所需要时间较长,为后

期光合有效物质积累从茎向籽粒的转移提供了可能 (图 4)。对照 CK 由于后期土壤水分充足,生物量没有出现明显的拐点。全生育期极端干旱的 2011 年,处理 RFM 生物量收获期其单株地上干物质达到了 28.36 g,较处理 CK、RF、FP 分别提高了 83.83%、64.17%、68.97%,且干重出现峰值的时间都滞后于 2010 年各处理,而处理 RF、FP 由于水分亏缺导致的干旱胁迫,没有出现峰值 (图 4)。2011 年全生育期水分亏缺也导致了繁殖分配尽可能向单株生物量积累转移,提高光合积累向营养器官分配的比例,获取较高的籽粒产量。从两年生物量的变化可以看到,在生育前期,充分灌溉处理的生物量积累均高于其它处理,且处理 FP、RF 在 95 d 之前 2010 年生长优势优于 2011 年,但 2011 年生育后期各处理表现出了较好的补偿效应,而较处理 RF、FP,RFM 对生物量补偿较提前了 10 d 左右时间。

2.4 垄沟栽培对燕麦产量构成因子的影响

产量高低最终决定于各个产量构成因子表现和贡献率,阶段性干旱的 2010 年,各处理除去分蘖数外,总体表现出如下趋势:处理 RFM 较处理组 FP、RF 有显著性差异,较对照 CK 无显著性有差异。而 RFM、RF、CK 的穗铃数、单株粒数、单株粒重、千粒重均比 FP 提高了 23.5%、1.7%、27.2%、-4.7%; -5.3%、-23.6%、0、-4.1%; 25.5%、1.5%、36.3%、4.1%。处理 RF 比对照 CK 依次降低了 5.3%、23.6%、0、4.1%。分蘖数各处理之间没有显著性差异,这可能与播前土壤贮水相对较好,而处理 CK 由于全生育期进行了充分灌溉,有效分蘖数较其它处理之间表现出了差异。2011 年全生育期极端干旱的背景下,处理 RFM 的优势进一步凸显,以上 4 项产量构成因子分别比 FP 提高了 58.9%、130.6%、475%、5.1%; 比 RF 分别提高了 -9.4%、6.4%、50.0%、2.6%。而 2011 年处理 RFM 的分蘖数和有效分蘖数较 CK、RF、FP 有显著性差异,而处理 RF、FP 与 CK 之间同样存在显著性差异 (表 2)。就两年处理 RFM 表现出的优势而言,2011 年在水分限制因子极端的调控下,尤其是单株粒数、单株粒重两项产量构成因子较 2010 年分别提高了 0.6 倍、5.1 倍。这也可能是 2011 年出苗率极低的情况下,处理 RFM 产量与对照组相比没有受到太大影响的原因。

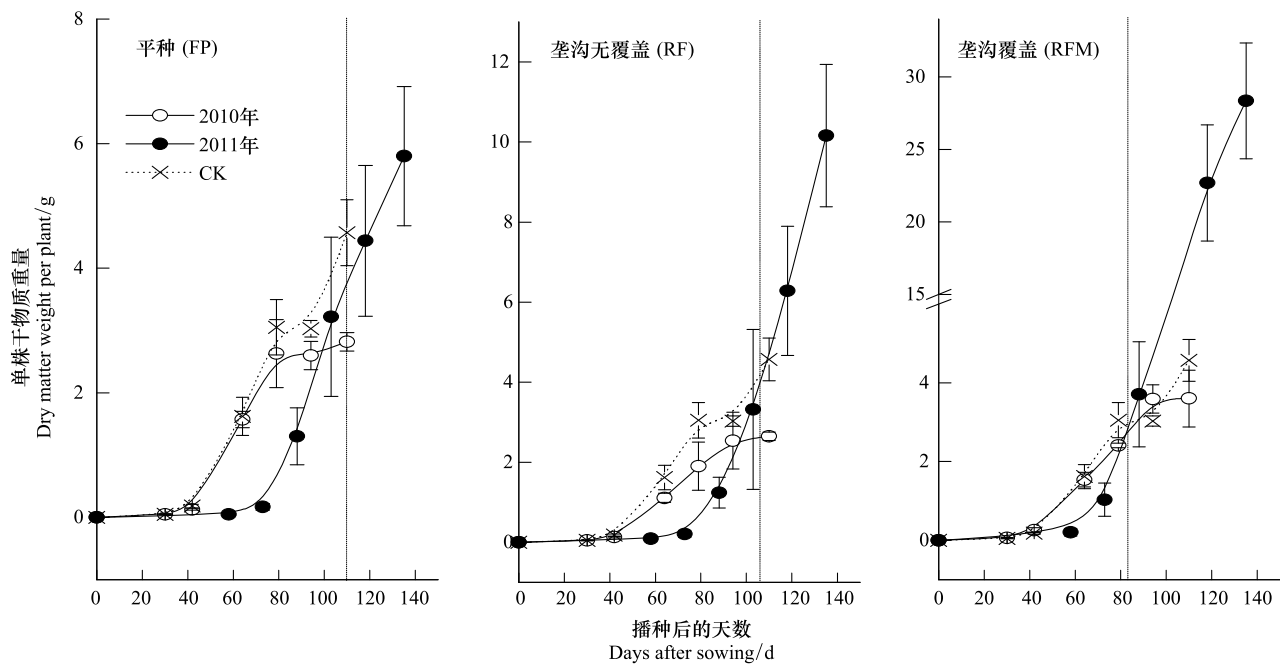


图 4 不同处理燕麦单株地上生物量随生育期的动态变化
Fig.4 The dynamic of biomass per plant under different treatments during oat different growing season

在阶段性干旱的 2010 年,所有处理的产量和生物量均高于全生育期极端干旱 2011 年,CK 地上生物量积累均显著高于 2010、2011 年各处理,这得益于它全生育期土壤水分的充足供应。产量除 2010 年处理 RFM 外,两年其它各处理均低于 CK(表 2),且处理 RFM 产量为 1833.5 kg/hm²,较 CK 提高 4.6%。阶段性干旱的 2010 年 RFM 处理较 CK 收获指数并没有显著提高,而全生育期极端干旱的 2011 较 CK 显著提高了 55.6%。全生育期极端干旱的

2011 年,处理 RFM 的产量依然达到了 1360 kg/hm²,而 RF 这种栽培模式在极端干旱年份相对于传统的耕作模式了反倒是限制了产量构成要素的增长。收获期地上生物量 CK 均显著高于两年各处理,2011 年各处理生物量均显著低于 2010 年各处理,但是在全生育期极端干旱的 2011 年处理 RFM 显著的高于处理 RF、FP。尽管生物量降低了,但产量并没有相应的大幅降低,这可能是覆膜垄沟栽培将有限的土壤水分用于增加产量构成因子。

表 2 不同处理对燕麦产量及产量构成因子的影响
Table 2 The effect of different treatments on oat yield and yield components

处理 Treatment	年份 Year	分蘖数 Tiller number	有效分蘖数 Available tillers number	穗铃数 Spikelet numbers	单穗粒数 Grain number per spike	单穗粒重 Grain weight per spike /g	千粒重 Thousand seed weight /g	地上生物量 Above- ground biomass /(kg/hm ²)	产量 Yield /(kg/hm ²)	收获指数 Harvest index	增加 产量 Increase yield /%
CK	2010	2.10a	1.23a	47.6a	101.2a	1.60a	15.9ac	22090.0a	1752.9a	0.08	0
FP	2010	2.40a	1.00a	35.3b	99.5a	1.1b	14.6b	11271.3b	1258.4b	0.11	-28.2
	2011	5.53b	2.00b	38.2b	72.1b	1.6a	15.5a	972.0c	426.1c	0.44	-75.6
RF	2010	1.63a	1.33a	33.4b	76.0b	1.1b	14.0b	10267.9b	1155.6b	0.11	-34.1
	2011	5.33b	2.63b	34.6b	76.7b	2.4c	15.9a	1143.4c	446.2c	0.39	-74.6
RFM	2010	1.90a	1.00a	44.3a	101.0a	1.5a	15.2a	15339.8d	1833.5d	0.12	4.6
	2011	8.87c	5.47d	60.7d	166.3c	9.2d	16.3c	7197.7e	1360.6e	0.18	-22.4

同一列中不同字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异 ($P < 0.05$)

2.5 垄沟栽培对收获期土壤水分变化影响

收获期土壤含水量反映了作物在全生育期对土壤各剖面水分摄取状况,在两个极端干旱类型年份,剖面含水量基本以 40—60 cm 为拐点,从 0—140 cm 土壤水分的变化呈“V”形变化趋势,2010、2011 年处理组 RFM、RF、FP、BF 0—60 cm 耕作层土壤含水量分别为 21.8%、16.7%、11.5%、16.3%;14.1%、14.9%、14.7%、16.4%;CK 为 14.65%。且土壤水分最低值发生在 40—60 cm 剖面内,通过试验也发现该层形成了土壤干层,而处理 BF 表层含水量基本一致。60 cm 以下土壤含水量逐渐回升,两年 80—140 cm RFM、RF、FP、BF 处理组的含水量分别为 13.5%、15.2%、14.4%、16.8%;13.2%、14.4%、13.5%、14.0%,CK 为 14.3%,可以发现,处理 RFM 含水量最低,这

可能是覆膜处理作物生长优势通过蒸腾作用对表层

水分消耗的同时,发达的根系会进一步将深层土壤水向上运输,以供给作物各个阶段对水分的需求。处理 BF 水分消耗主要是蒸发损失,因此含水量相对高于其它处理,2010 年整个 0—140 cm 剖面基本维持在 15%左右(图 5),几乎成直线型变化,2011 年 BF 下层含水量低于 RF、CK,高于 RFM、FP,仍然遵循 V 型趋势,但拐点发生在 80 cm 左右处。且两年的研究表明,120 cm 以下剖面土壤水分,几乎不受耕作的影响,两年处理 RFM、RF、FP、BF 的含水量分别为 16.3%、17.1%、17.5%、17.1%;14.7%、15.1%、14.7%、15.1%,且阶段性极端干旱的 2010 年要高于全生育期极端干旱的 2011 年。

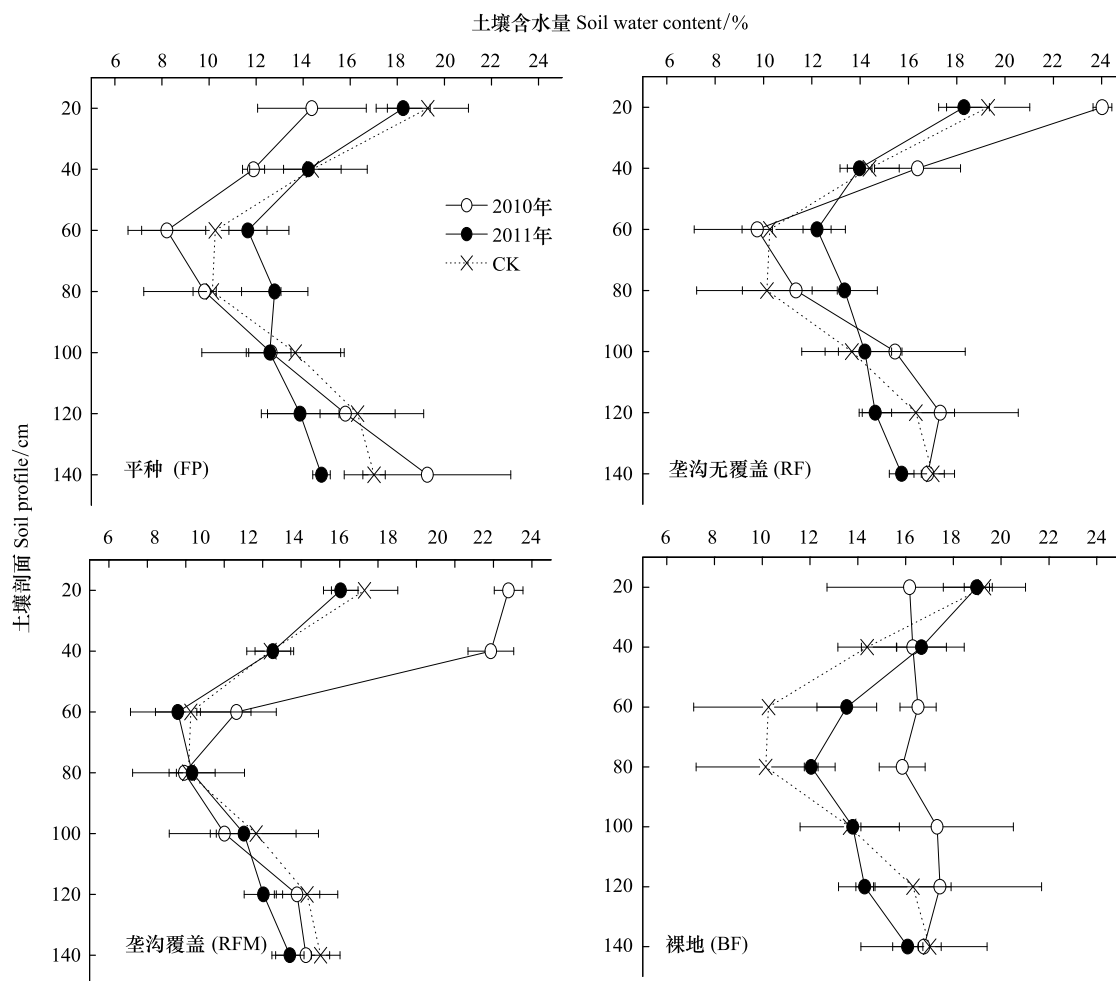


图 5 不同处理收获期 0—140cm 各剖面的土壤水分含量变化

Fig.5 The dynamic of soil water content with soil depth changes under different treatments during mature stage

2.6 垄沟栽培对全生育期土壤贮水量变化影响

在阶段性极端干旱的 2010 年,土壤贮水量在全

生育期的变化经历了 3 个主要的过程,前 40 d 略有增加,后面持续降低,但并非直线下降,而在 70 d 左

右水分又一次短暂的回升,这可能是在这个生育阶段降水的补给超过作物的耗水需求,再从灌浆期到成熟期贮水量回升阶段。在开始阶段,处理 RFM 要略高于 RF 和 CK,随后开始下降,这与其作物生长旺盛,对水分的高消耗有关,而在后期的恢复阶段,处理 RFM 可以更有效的将降雨转化为土壤水,贮水量明显高于其它处理,且表现出 $BF > RFM > RF > CK > FP$ (图 5),进一步凸显了处理 RFM 种耕作栽培方式对土壤水分利用的优势。裸地由于无种植,除表层在开始阶段受到蒸发影响外,此后水分相对稳定,基本维持在 210 mm 左右,不受作物生长对水分的主动调控。全生育期极端干旱的 2011 年各,各处理经历了两个变化阶段,从开始到 90 d 左右下降阶段,随后到收获期的回升阶段,而处理 RFM 的下降一直持续到

了 100 d 左右,在前 80 d 要高于 BF 和 FP,而在随后的 90—100 d 左右处理 FP 水分开始缓慢回升,而处理 RF、RFM 在短暂时间内再次出现了急剧下降阶段,从开始 200 mm 左右直降到 135 mm (图 5),尽管收获期水分逐步的开始恢复,但由于前一阶段对水分的过度消耗,加之没有降雨及时的补给,导致收获后土壤贮水量低于其它处理,有如下趋势: $BF > FP > RF > CK > RFM$ 。在两个极端气候类型背景下,降雨相对较好的 2010 年,各处理生育期的平均贮水量均高于 2011 年,而垄沟处理 RF、RFM 在生育后期贮水开始明显回升,2010 年处理 RFM 100 d 以后贮水量达到了 171.4 mm,较 RF、FP 分别提高了 4.3 mm、30.5 mm,2011 年 RF 贮水量为 195.4 mm,较其它处理最高。

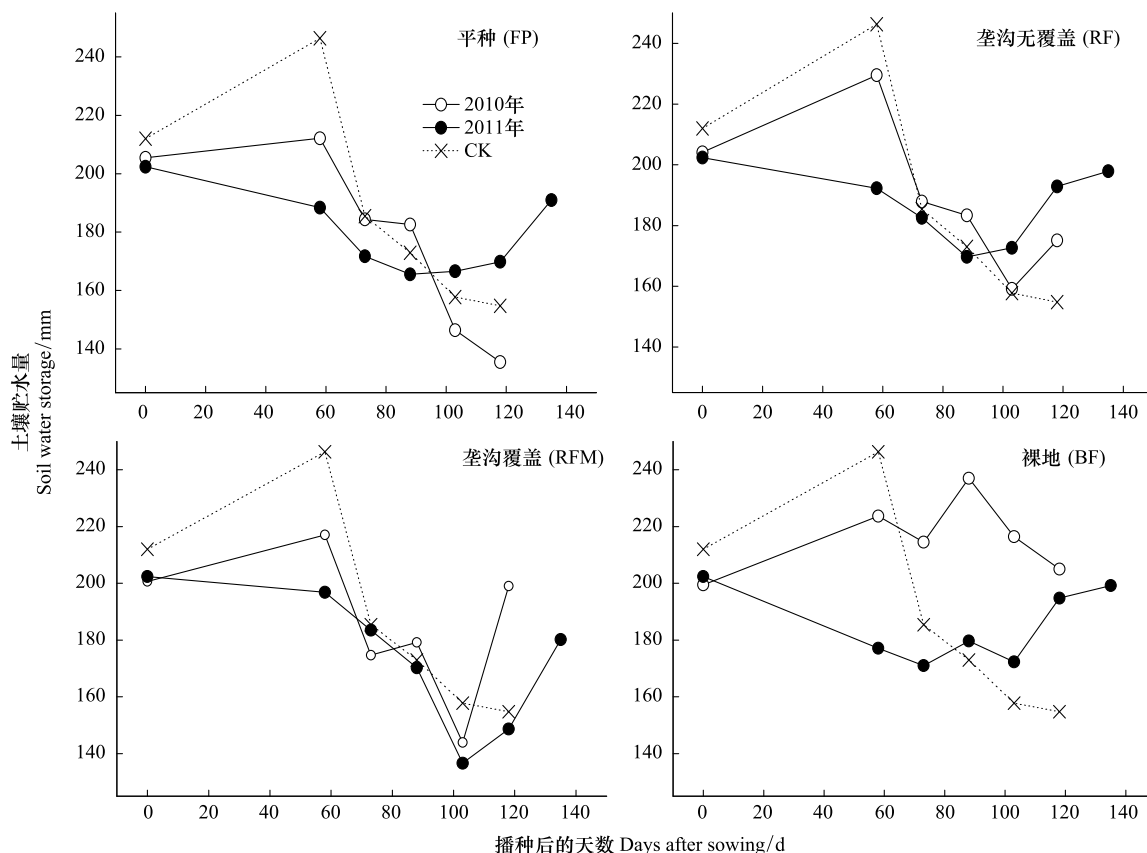


图 6 不同处理下 1m 内土壤剖面贮水量变化

Fig.6 The dynamic of stored water amount within one-meter soil depth under different treatments

2.7 垄沟栽培对作物生育期、耗水量、水分利用效率、水生产力的影响

在阶段性极端干旱的 2010 年,处理 FP 生育期要短于处理 RFM 约一周的时间,而充分灌溉处理 CK 的生育期最长,达到了 119 d。这与水分充足拓

宽了灌浆期长度有关,而全生育期极端干旱的 2011 年各处理的生育期相对于 2010 年平均延后了 25 d 左右(表 3)。2010 年各处理土壤耗水量为 $FP > CK > RF > RFM$,处理 RFM 低于其它处理,而在全生育期极端干旱 2011 年恰好相反,处理 RFM 由于其在生物

量繁殖优势,导致了对土壤水过度消耗和利用,耗水量最高。2010 年处理 RFM 水分利用效率较对照提高了 22.4%;全生育期极端干旱的 2011 年,处理 RFM 水分利用效率达到了 $14.1 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照 CK 提高了 85.5%,且比 2010 年提高了 34.2%,而两年处理 RF 和 FP 水分利用效率分别为 5.3、5.0; 5.7、5.0 $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 均显著低于 CK 值

$7.6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。极端性极端干旱的 2010 年,覆膜处理 RFM 大田的水生产力显著性高于 CK,而处理 RF、FP 显著低于 CK。全生育期极端干旱的 2011 年,处理 RFM 的水分利用效率,水生产力均显著高于其它处理,尤其水生产力达到了 $18.3 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,比对照 CK 提高了 53.6%(表 3),但处理组 RF 和 FP 显著低于对照组。

表 3 不同处理下燕麦大田土壤耗水量、水分利用效率、水生产力比较

Table 3 Comparisons of water consumption, yield and water use efficiency under different treatments in an oat field

处理 Treatment	年份 Year	生育期 The whole of growth /d	降雨 Rainfall /mm	土壤供水量 SWS /mm	土壤耗水量 SWC /mm	产量 Yield /(kg/hm^2)	水分利用效率 WUE /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	增加水分 利用效率 Increase WUE /%	水生产力 Water productivity /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
CK	2010	119a	206.6	23.7b	230.3a	1752.9a	7.6a	0	8.5a
RF	2010	115a	206.6	10.5c	217.1ca	1155.6b	5.3b	-30.3	5.6b
	2011	137b	74.2	4.5a	78.7b	446.2c	5.7 b	-25.0	6.0b
RFM	2010	111a	206.6	-8.4c	198.0c	1833.5d	9.3c	22.4	8.9a
	2011	138b	74.2	22.2b	96.4b	1360.6e	14.1d	85.5	18.3c
FP	2010	116a	206.6	46.8a	253.4a	1258.4be	5.0b	-34.2	6.1b
	2011	137b	74.2	11.4c	85.6b	426.1c	5.0b	-34.2	5.7b

同一列中不同字母表示不同处理间达到 0.05 水平显著差异 ($P < 0.05$)

3 讨论

垄沟覆膜集雨栽培技术大幅度提高生物量的积累和提升作物产量,已经成为雨养农业区生产力跃升和稳定的主要强动力^[47-53]。垄沟与地膜相结合耕作模式,首先是通过增加雨水收集效率和土壤容纳降雨的空间,进而提高作物水分利用效率,形成较好的水分补偿效应,有效地弥补了裸露栽培水分蒸发快、不保墒的缺陷,显著地改变了作物对极端干旱气候的适应对策,最终影响作物的出苗、成苗和产量形成^[53-55]。该技术能明显减除玉米“卡脖子旱”现象,通过增加穗粒数和千粒重等穗部相关系数、以及单位面积的分蘖数而达到增产目标^[56-61]。

土壤深层干燥化在旱作农业区是一种特殊水文现象,其后果是形成土壤干层。研究指出,黄土高原旱作粮田深层土壤干燥化现象日益凸显,受植被覆盖类型、作物种类、土壤类型和播种年限的影响,土壤干层的变动范围存在较大的差异,且随着播种年限增加和连续干旱的发生,土壤干燥程度会加深^[62-64]。已有研究表明,以土壤水分含量低于 11% 的土层全部看作土壤干层^[65]。本研究发现两年收

获期不同剖面的水分变化主要发生在 1 m 以上的土层,除去充分灌溉,其它 3 个处理组 FP、RF 和 RFM 对 60 cm 处水分的消耗最为严重,两年平均含水量分别为 9.9%、11.0%、11.1%,低于其它各剖面,出现了土壤干层。在 2011 年处理 RFM 含水量最低,仅为 9.5%,推测是由于在极端干旱与水势梯度双重作用下,土壤水分强烈蒸发形成^[66]。但覆膜处理由于其高效的集雨性和抑蒸性,能够快速促进表面水分的回升,表层土壤水分高于其它处理,因此能够囤积更多有效水分向下运输,也提高了土壤水分潜在的恢复能力,这对连年播种可能加剧的土壤干层现象具有一定的缓解效应。而垄沟无覆膜处理 1 m 以下水分受作物的生长而发生的迁移和交换影响较小,能维持较为稳定的含水值。平种和裸地由于其表层蒸发高,导致了较大的下层水分波动^[59],既不利于各个土壤剖面维持水分动态平衡,也不利于极端气候下作物的持久抗旱性。

两个极端干旱类型年份,生育期土壤贮水量呈现出以孕穗期为分界点,前期一直降低,随后逐渐恢复。2010 年前期垄沟覆膜处理低于其它处理,这与生育期降雨分布均匀正常年份垄沟地膜覆盖能够提

高土壤贮水量有差异^[67-68],这可能是垄沟覆膜系统增加了燕麦建苗期水分的供应,为燕麦出苗和前期生长提供了充足水分的储备,尤其消耗了耕作层土壤蓄水。由于处理 RFM 产流快,减少了径流量,两年前期土壤贮水量较高,而后期含水量低是由于作物生物量的积累和籽粒灌浆的形成加速了水分的消耗,实现了前期蓄水后期供水,解决了降雨导致的作物水分供需矛盾,整个生育期 1 m 内平均贮水量比垄沟无覆盖、平地分别提高 4.1、12.1 mm。已有研究表明,裸燕麦普通膜垄、可降解膜垄和土垄的土壤贮水量比平作分别提高 102、83 mm 和 61 mm,尽管受到干旱抑制,提高幅度较小,但是膜垄集雨优势依然明显,与本研究结果一致^[69]。而在全生育极端干旱 2011 年孕穗期以后垄沟覆膜处理 1 m 内平均贮水量仅为 158.9 mm,较垄沟无覆盖和平种减少了 24.3、14.3 mm,首先由于垄沟覆膜栽培体系根据群体生长的需求对土壤水分进行了时间上的再分配,其次是极端干旱气候条件下,垄沟覆膜在抑蒸、集雨和膜下毛细管提“墒”的共同作用下,以消耗深层土壤贮水量为代价维持作物生长^[70-72]。垄沟覆膜处理的高耗水也加大了后期土壤水分恢复的难度和周期。尽管对照组在两个极端干旱年份从苗期到灌浆期土壤贮水量相对较高,但收获期土壤水分没有表现出回升的趋势,因此在旱地雨养农业可持续的背景下,此种耕作方式不利于下茬作物的生产。

土壤-植物-大气连续体是实现农田水循环的关键^[73],而土壤水是降雨转化为作物水的中间枢纽。当极端干旱导致的水分亏缺出现在苗期时,会发生作物物候的改变,尤其拉长出苗所需的时间,这从 2011 年的苗期来看,比 2010 年平均晚了 25 d 左右,最终导致了整个燕麦物候期的滞后。这与研究表明水分缺失常常使植物物候延迟,推迟时间与干旱程度有关一致^[74]。研究指出,在生育期 230、340 mm 和 440 mm 不同的降雨条件下,通过垄沟覆膜方式播种,玉米水分利用效率和产量分别较传统平种提高了 77.4%、43.1%、9.5%;82.8%、43.4%、11.2%^[75],证明在降雨量为 230 mm 的最低年份,各项指标提升的潜力最大。本研究表明,在极端干旱环境下,垄沟覆膜覆盖能够进一步提高土壤水的利用效率和大田水生产力,尤其在 2011 年生育期降雨量仅为 74.2 mm,两项指标较对照分别提高了 85.5%、115.3%,产量较

平种提高了 209.1%,与以上研究相一致。因此垄沟覆盖栽培系统在极端干旱年份,最大程度的满足了作物对水分的供需分配,实现了雨水、土壤水、作物水“三水”的优化配置利用,从空间上拉拢了该区降水资源与作物需水之间的错位,是应对极端干旱条件,维持产量稳定的优势选择。

4 结论与展望

燕麦作为寒旱地区的优势作物,对自然环境具有较强的适应能力,不仅有利于调节当地的农事活动,而且由于其抗旱、耐寒的优良特性,其未来必将有广阔的应用和推广空间^[76-77]。而垄沟覆膜栽培也极大地弥补了燕麦在极端气候下的产量亏缺,尤其在全球气候变化的背景下,其作为第三主粮的生产潜力为解决我国高寒草地草畜供求矛盾,保护草地资源可持续性发展和世界粮食安全做出贡献^[78-79]。

在极端气候事件发生情况下,垄沟覆膜栽培技术作为重要抗旱技术具有较好的适应性,尽管产量输出和地上生物量积累受到了抑制,但可通过积极提升生育后期土壤水分以缓解土壤干层,并采取不同的生物量补偿和穗部优化策略来缓解极端干旱带来的产量下降。从时间和空间尺度上优化了作物对水资源的供需匹配,从而提高了作物水分利用效率和大田水生产力,提高了极端干旱背景下燕麦的抗旱性和大田产量的稳定性,是应对极端气候变化和提高旱区粮食安全的重要生态策略。我们的研究旨在为干旱区雨养农业应付极端气候提供一定的借鉴,也拓展了垄沟覆盖栽培作为重要的抗旱技术在更复杂环境下推广可能。然而在极端气候的影响下,作物地下根系的分布和分配,以及土壤养分的输入和输出变化尚需进一步的探究,力求从土壤水分、养分、以及作物株型指标综合解释其应对极端天气的生产、生态过程。

References:

- [1] Zhai P M, Pan X H. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographical Sinica*, 2003, 58(S1): 1-10.
- [2] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C. Climate extremes: Observations, modeling and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [3] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, Karl T R, Kunkel K

- E, Ambenje P. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417-426.
- [4] Jiang Z H, Song J, Li L, Chen W L, Wang Z F, Wang J. Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection. *Climatic Change*, 2012, 110;(1/2): 385-401.
- [5] Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. Detection of trends in China's precipitation extremes. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(2): 208-216.
- [6] Zhai P M, Wang C C, Li W. A review on study of change in precipitation extremes. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 144-148.
- [7] Qin D H, Ding Y H, Su J L, Ren J W, Wang S W, Wu R S, Yang X Q, Wang S M, Liu S Y, Dong G R, Lu Q, Huang Z G, Du B L, Luo Y. Assessment of climate and environment changes in China (1): Climate and environment changes in China and their projection. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 4-9.
- [8] Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905-910.
- [9] Li X Y, Gong J D, Gao Q Z, Li F R. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 2001, 50(3): 173-183.
- [10] Dong H Z, Li W J, Tang W, Zhang D M. Early plastic mulching increases and establishment and lint yield of cotton in saline fields. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 269-275.
- [11] Wang J, Li F M, Song Q H, Li S Q. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 205-210.
- [12] Li X Y, Shi P J, Sun Y L, Tang J, Yang Z P. Influence of various in situ rainwater harvesting methods on soil moisture and growth of *Tamarix ramosissima* in the semi-arid loess region of China. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(1): 143-148.
- [13] Li Z Q, Guo W D, Yang T E. Analysis of soil moisture redistribution in farmland under bed-irrigating sowing. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(1): 108-109.
- [14] Li Y P, Jia Z K, Liu S X, Han Q F. Characteristics of runoff generation water storage and rainwater distribution under micro-catchment planting in dry-land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 86-90.
- [15] Tian Y D, Su R, Li F M, Li X L. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. *Field Crops Research*, 2003, 84(3): 385-391.
- [16] Xiao G J, Zhang Q, Xiong Y C, Lin M Z, Wang J. Integrating rainwater harvesting with supplemental irrigation into rain-fed spring wheat farming. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 429-437.
- [17] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, Vera C L, Zhang Y B, Wang J N. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 374-382.
- [18] Zhang D Q, Liao Y C, Jia Z K. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1): 208-213.
- [19] Carter D C, Miller S. Three years' experience with an on-farm macro-catchment water harvesting system in Botswana. *Agricultural Water Management*, 1991, 19(3): 191-203.
- [20] Li X Y, Gong J D, Wei X H. In-situ rainwater harvesting and gravel mulch combination for corn production in the dry semi-arid region of China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 46(4): 371-382.
- [21] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China. *Agricultural Water Management*, 2005, 75(1): 71-83.
- [22] Zhang J Y, Sun J S, Duan A W, Wang J L, Shen X J, Liu X F. Effects of different planting patterns on water use and yield performance of winter wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, 2007, 92(1/2): 41-47.
- [23] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, Liu Z P. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [24] Ren M X, Jiang X H, Zhang D Y. Some important questions in plant reproductive ecology. *Biodiversity Science*, 2012, 20(3): 241-249.
- [25] Jin Y H, Zhou D W, Jiang S C. Comparison of soil water content and corn yield in furrow and conventional ridge sown systems in a semiarid region of China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2): 326-332.
- [26] Li J, Jiang B, Hu W, Ci R Y J, Zhao Y J, Li X F, Chen B. Characteristics of deep soil desiccation on rainfed grain croplands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(12): 2124-2134.
- [27] Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 353-356.
- [28] Hu W, Chen Y. Research on soil desiccation on dry farmland in semi-arid area of Loess Plateau. *Journal of He'nan Agricultural Sciences*, 2013, 42(4): 75-79.
- [29] Chakraborty D, Nagarajan S, Aggarwal P, Gupta V K, Tamar R K, Garg R N, Sahoo R N, Sarkar A, Chopra U K, SundaraSarma K S, Kalra N. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a Semiarid environment. *Agricultural Water Management*, 2008, 95

- (12): 1323-1334.
- [30] Anikwe M A N, Mbah C N, Ezeaku P I, Onyia V N. Tillage and plastic mulch effects on soil properties and growth and yield of cocoyam (*Colocasia esculenta*) on an ultiso in southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 264-272.
- [31] Zhou L M, Jin S L, Liu C A, Xiong Y C, Si J T, Li X G, Gan Y T, Li F M. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interaction: opportunities and challenges in a semiarid agro-ecosystem. *Field Crops Research*, 2012, 126: 181-188.
- [32] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, Jia Y, Li F M, Xiong Y C, Li X G. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(4): 241-249.
- [33] Lu X, Wang Q, Zhao H P, Zhang X L, Han Y L. Effects of salt stress on seed germination and emergence of different oats varieties. *Pratacultural Science*, 2009, 26(7): 77-81.
- [34] Qiao Y M. Effects of seeding density on quantitative characters of oat. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 31-32.
- [35] Jia Z F, Zhou Q P, Han Z L, Yan H B. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on the naked oat production performance. *Pratacultural Science*, 2007, 24(6): 19-22.
- [36] Liu Y, Dong L. Nutrition components of oats and its health function. *Food and Nutrition in China*, 2009, (3): 55-57.
- [37] Hu X Z. Food processing and functional character of oats. *Journal of Triticale Crops*, 2005, 25(5): 122-124.
- [38] Moreira N. The effect of seed rate and nitrogen fertilizer on the yield nutritive value of oat-vetch mixture. *Journal of Agricultural Science*, 1989, 112(1): 57-66.
- [39] Liu J H, Qiu A Y, Zhu X J. Oat lipid and its applications. *Journal of Cereals and Oils*, 2003, (5): 19-20.
- [40] Wei J, Guo Y R, Jin X P, Liu C, Zhao M. Study on quality of physical and chemic and analysis on composition of fatty acid from oat oil. *Food Science and Technology*, 2006, 31(7): 204-206.
- [41] Liu D X, Dong A X, Deng Z Y. Impact of climate warming on agriculture in northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 119-125.
- [42] Zhao H, Xiao G J, Wang R Y, Deng Z Y, Wang H L, Yang Q G. Impact of climate change on spring wheat growth in semi-arid rain feed region. *Advances in Earth Science*, 2002, 22(3): 322-327.
- [43] Ren Z X, Yang D Y. Impacts of climate change on agriculture in the arid region of northwest China in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(8): 48-53.
- [44] Ma J Y, Xu Y L, Pan J. Analysis of agro-meteorological disasters tendency variation and the impacts on grain yield over northeast China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(2): 283-288.
- [45] Zhao X L. Influence of climate change on agriculture in northeast China in recent 50 year. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9): 144-149.
- [46] Qu W, Liu D X, Yang S H. A study of extreme arid climate in Gansu Province from 1994 to 2000. *Gansu Meteorology*, 2003, 21(1): 11-15.
- [47] Zhong L P, Shao M A, Li Y S. Changes of ecosystem productivity responding to driving forces in semiarid region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 7(4): 510-515.
- [48] Qin S H, Zhang J L, Wang D, Pu Y L, Du Q Z. Effects of different film mulch and ridge-furrow cropping patterns on yield formation and water translocation of rainfed potato. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 389-394.
- [49] Zhang H, Li J, Jia Z K, Zhang T, Hou X Q, Zhang P. Effect of different mulching materials on arid-field soil moisture and spring maize yield in Weiwei arid fields. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 93-100.
- [50] Shi R P, Shang G Y X, Ma Q R, Wang Q L. Effects of sowing density and N rate on biomass accumulation and yield of winter wheat in furrow and ridge film mulching. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 823-830.
- [51] Gao Y H, Niu J Y, Yan Z L, Guo L Z, Jiang H Y, Ma P L, Ma J H. Effects of different plastic-film mulching techniques on maize (*Zea mays L.*) dry matter accumulation and yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 440-446.
- [52] Zhao H, Xiong Y C, Li F M, Wang R Y, Qiang S C, Yao T F, Mo F. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agro-ecosystem. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 68-78.
- [53] Mu Z X, Liang Z S, Zhang S Q. Physiological basis of compensation growth of crops under soil alternate drying wetting and its application in agricultural produce. *Plant Physiology Communications*, 2002, 38(5): 511-516.
- [55] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: Furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches. *Agriculture Water Management*, 2002, 54(3): 243-254.
- [56] Fang Y J, Huang G B, Li L L, Wang J. Yield and growth dynamics of rainfed maize in the system of completely mulched alternating narrow and wide ridges with furrow planting. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 128-134.
- [57] Li Q Z, Li Y Z, Guo J X, Liu X Y, Xu C Y. Effects of field rainwater harvesting by plastic mulch and complement irrigation on soil water and yield of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 25-30.
- [58] Du Y J, Li Z Z, Li W L. Effect of different water supply regimes on growth and size hierarchy in spring wheat populations under mulched with clear plastic film. *Agriculture Water Management*, 2006, 79(3): 265-279.
- [59] Donald C M, Hamblin J. The convergent evolution of annual seed

- crops in agriculture. *Advances in Agronomy*, 1983, 36: 97-143.
- [60] Wang H L, Zhang X C, Song S Y, Ma Y F, Yu X F. Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of northwest Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (5): 917-926.
- [61] Cong J O, Li N, Xu Y J, Gu W, Le Z Y, Huang S Q, Xi B, Lei Y. Relationship between indices of growth physiology and reflectivity and yield of winter wheat under water stress. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 67-71.
- [62] Cao Y, Li J, Zhang S H, Wang Y L, Cheng K, Wang X C, Wang Y L, Naveed Tahir M.. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones on the Loess Plateau in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15): 72-79.
- [63] Fan J, Shao M A, Wang Q J, Jones S B, Reichardt K, Cheng X R, Fu X L. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 93-100.
- [64] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 159(1/2): 99-108.
- [65] Fu M S, Qian W D, Niu P, Ma G L. Impact of the continuous drought on the depth of dry soil layer and on the existence of plants. *Arid Zone Research*, 2002, 19(2): 71-74.
- [66] Wang L, Shao M A, Hou Q C. The primary research on dried soil layer in the Loess Plateau. *Journal of Northwest Sci-Tec University of Agriculture and Forestry*, 2001, 29(4): 34-38.
- [67] Wang Q, Zhang E H, Li F M. Runoff efficiency and soil water comparison of plastic covered ridge and ridge with compacted soil at different rainfall harvesting stages in semiarid area. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1816-1819.
- [68] Wang F X, Feng S Y, Hou X Y, Kang S Z, Han J J. Potato growth with and without plastic mulch in two typical regions of Northern China. *Field Crops Research*, 2009, 110(2): 123-129.
- [69] Huo H L, Wang Q, Zhang E H, Shi S L, Ren X, Wang T T, Liu Q L. Effects of rainwater harvesting planting with ridges and furrow on number of plant and soil water storage of alfalfa and naked oat. *Grassland and Turf*, 2012, 32(6): 1-6.
- [70] Huang M B, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the Loess Plateau on soil water cycle. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(6): 50-54.
- [71] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat. *Field Crops Research*, 1999, 63(1): 79-86.
- [72] Li F M, Yan X, Wang J, Li S Q, Wang T C. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(3): 330-333.
- [83] Manzoni S, Vico G, Porporato A, Katul G. Biological constraints on water transport in soil-plant-atmosphere system. *Advances in Water Resource*, 2013, 51: 292-304.
- [74] Tsuda M. Effects of water deficit on panicle exertion in rice (*Oryza sativa* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) moench). *Japanese Journal of Crop Science*, 1986, 55(2): 196-200.
- [75] Li R, Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, Ren X L, Yang B P. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 101-109.
- [76] Liu L L, Cui L, Liu G K, Han M S, Chang Z Y. Current status of Shanxi oat industry and its technology development needs. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2010, 38(8): 12-12.
- [77] Meng F Y, Li S Y. Study on the leading industries after abandoned in northwest of Hubei province. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(12): 2578-2581.
- [78] Wang T, Xu C L, Zhou Z Y, Wang N, Jiang W Q. The gray comprehensive evaluation on production performance of 36 cultivated Oat (*Avena sativa*) varieties in alpine meadow region. *Journal of Forage and Feed*, 2010, 4(1): 16-24.
- [79] Marshall A S, Cowan S, Edwards S, Griffiths I, Howarth C, Langdon T, White E. Crops that feed the world 9. Oats-a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications. *Food Security*, 2013, 5(1): 13-33.

参考文献:

- [1] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [5] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测. *气象学报*, 1999, 57(2): 208-216.
- [6] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148.
- [7] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 任贾文, 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 王苏民, 刘时银, 董光荣, 卢琦, 黄镇国, 杜碧兰, 罗勇. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来趋势. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 4-9.
- [8] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905-910.
- [13] 李子强, 郭维东, 杨天恩. 坐水播种时耕层土壤水分再分布的数值分. *安徽农业科学*, 2006, 34(1): 108-109.
- [14] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 韩清芳. 旱作农田微集水种植产流蓄墒扩渗特征研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 86-90.
- [24] 任明迅, 姜新华, 张大勇. 植物繁殖生态学的若干重要问题. *生物多样性*, 2012, 20(3): 241-249.
- [26] 李军, 蒋斌, 胡伟, 次仁央金, 赵玉娟, 李晓芳, 陈兵. 黄土高原不同类型旱区旱作粮田深层土壤干燥化特征. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2124-2134.

- [27] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
- [28] 胡伟, 陈豫. 黄土高原半干旱区旱作农田土壤干燥化研究. 河南农业科学, 2013, 42(4): 75-79.
- [33] 芦翔, 汪强, 赵惠萍, 张晓亮, 韩燕来. 盐胁迫对不同燕麦品种种子萌发和出苗影响的研究. 草业科学, 2009, 26(7): 77-81.
- [34] 乔有明. 不同播种密度对燕麦几个数量性状的影响. 草业科学, 2002, 19(1): 31-32.
- [35] 贾志锋, 周青平, 韩志林, 颜红波. N、P 肥对裸燕麦生产性能的影响. 草业科学, 2007, 24(6): 19-22.
- [36] 刘影, 董利. 燕麦的营养成分与保健作用. 中国食物与营养, 2009, (3): 55-57.
- [37] 胡新中. 燕麦食品加工及功能特性研究进展. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 122-124.
- [39] 刘军海, 袭爱冰, 朱向菊. 燕麦脂质及其应用. 粮食与油脂, 2003, (5): 19-20.
- [40] 魏决, 郭玉蓉, 金小培, 刘晨, 赵敏. 燕麦油脂的理化性质研究及脂肪酸组成分析. 食品科技, 2006, 31(7): 204-206.
- [41] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.
- [42] 赵鸿, 肖国举, 王润元, 邓振镛, 王鹤龄, 杨启国. 气候变化对半干旱雨养农业区春小麦生长的影响. 地球科学进展, 2007, 22(3): 322-327.
- [43] 任朝霞, 杨达源. 近 50a 西北干旱区气候变化对农业的影响. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 48-53.
- [44] 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 东北地区农业气象灾害的趋势变化及其对粮食产量的影响. 中国农业气象, 2012, 33(2): 283-288.
- [45] 赵秀兰. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响. 东北农业大学学报, 2010, 41(9): 144-149.
- [46] 瞿汶, 刘德祥, 杨苏华. 甘肃省 1994—2001 年极端干旱气候特征研究. 甘肃气象, 2003, 21(1): 11-15.
- [47] 钟良平, 邵明安, 李玉山. 农田生态系统生产力演变及驱动力. 中国农业科学, 2004, 37(4): 510-515.
- [48] 秦舒浩, 张俊莲, 王蒂, 蒲育林, 杜全中. 覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响. 应用生态学报, 2011, 22(2): 389-394.
- [49] 张惠, 李娟, 贾志宽, 张涛, 侯贤清, 张鹏. 渭北旱塬不同覆盖材料对旱作农田土壤水分及春玉米产量的影响. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 93-100.
- [50] 师日鹏, 上官宇先, 马巧荣, 王林权. 密度与氮肥配合对垄沟覆膜栽培冬小麦干物质累积及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 823-830.
- [51] 高玉红, 牛俊义, 闫志利, 郭丽琢, 姜寒玉, 马朋丽, 马菊红. 不同覆膜栽培方式对玉米干物质积累及产量的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 440-446.
- [53] 慕自新, 梁宗锁, 张岁岐. 土壤干湿交替下作物补偿生长的生理基础及其在农业中的应用. 植物生理学通讯, 2002, 38(5): 511-516.
- [54] 李屹, 黄高峰, 孙雪梅. 干旱胁迫对菊芋苗期生长的影响. 江苏农业科学, 2012, 40(10): 75-77.
- [56] 方彦杰, 黄高宝, 李玲玲, 汪佳. 旱地全膜双垄沟播玉米生长发育动态及产量形成规律研究. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 128-134.
- [57] 李巧珍, 李玉中, 郭家选, 刘晓英, 徐春英. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(2): 25-30.
- [60] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 马一凡, 于显枫. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种对玉米季节性耗水和产量的调节机制. 中国农业科学, 2013, 46(5): 917-926.
- [61] 丛建鸥, 李宁, 许映军, 顾卫, 乐章燕, 黄树青, 席宾, 雷颢. 干旱胁迫下冬小麦产量结构与生长、生理、光谱指标的关系. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 67-71.
- [62] 曹裕, 李军, 张社红, 王亚莉, 程科, 王学春, 王玉玲, Naveed Tahir M. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征. 农业工程学报, 2012, 28(15): 72-79.
- [65] 付明胜, 钱卫东, 牛萍, 马光亮. 连续干旱对土壤干层深度及植物生存的影响. 干旱区研究, 2002, 19(2): 71-74.
- [66] 王力, 邵明安, 侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 34-38.
- [67] 王琦, 张恩和, 李凤民. 半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较. 生态学报, 2004, 24(8): 1816-1819.
- [69] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 师尚礼, 任祥, 王田涛, 刘青林. 沟垄集雨对紫花苜蓿和裸燕麦出苗及土壤贮水量的影响. 草原与草坪, 2012, 32(6): 1-6.
- [70] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.
- [72] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 李世清, 王同朝. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理. 中国农业科学, 2001, 34(3): 330-333.
- [76] 刘龙龙, 崔林, 刘根科, 韩美善, 常志勇. 山西省燕麦产业现状及技术发展需求. 山西农业科学, 2010, 38(8): 12-12.
- [77] 孟凡艳, 李淑源. 冀西北地区退耕后主导产业选择的实证分析. 湖北农业科学, 2011, 50(12): 2578-2581.
- [78] 王桃, 徐长林, 周志宇, 王楠, 姜文清. 高寒草甸区 36 种栽培燕麦生产性能的灰色综合评价. 牧草与饲料, 2010, 4(1): 16-24.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.7 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The 5000-year climate change of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and historical ecology of Zoige wetlands HE Yixin, WU Ning, ZHU Qiu'an, et al (1615)
- Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors Aminem ELI, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al (1626)

Autecology & Fundamentals

- Daily stem radial variation of *Pinus koraiensis* and its response to meteorological parameters in Xiaoxing'an mountain LI Xinghuan, LIU Ruipeng, MAO Zijun, et al (1635)
- Effects of logging residues on surface soil biochemical properties and enzymatic activity WU Bobo, GUO Jianfen, WU Junjun, et al (1645)
- Characteristics of soil macroaggregates under typical forests in Pangquangou Nature Reserve BAI Xiumei, HAN Youzhi, GUO Hanqing (1654)
- Modeling tree crown structure of Simao pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*) natural forest OU Guanglong, XIAO Yifa, WANG Junfeng, et al (1663)
- Influence of magnesium deficiency and excess on chlorophyll fluorescence characteristics of Newhall navel orange leaves LING Lili, HUANG Yi, PENG Liangzhi, et al (1672)
- Seed foraging and dispersal of Chinese yew (*Taxus chinensis* var. *mairei*) by frugivorous birds within patchy habitats LI Ning, WANG Zheng, LU Changhu, et al (1681)
- Interactions between heavy metal lead and two freshwater algae LIU Lu, YAN Hao, LI Cheng, et al (1690)
- Annual variations of the primary productivity and its size-fractioned structure in culture ponds of *Apostichopus japonicus* Selenka JIANG Senhao, ZHOU Yibing, TANG Boping, et al (1698)
- Growth and photosynthetic activity of *Microcystis* colonies after gut passage through silver carp and bighead carp WANG Yinping, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (1707)
- Contents of two coumarins in *Ipomoea cairica* and their effects on *Pomacea canaliculata*, *Orzya sativa*, and *Echinochloa crusgalli* YOU Changyan, YANG Yu, HU Fei, et al (1716)

Population, Community and Ecosystem

- Population and habitat status of Asian elephants (*Elephas maximus*) in Mengla Sub-reserve of Xishuangbanna National Nature Reserve, Yunnan of China LIN Liu, JIN Yanfei, CHEN Dekun, et al (1725)
- Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China LI Fan, XU Bingqing, MA Yuanqing, et al (1736)
- Effect of long-term fertilization pattern on weed community diversity in wheat field JIANG Min, SHEN Mingxing, SHEN Xinping, et al (1746)
- Ecological process of water transformation in furrow and ridge mulching system in oat field under extreme drought scenario ZHOU Hong, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (1757)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Simulations and analysis on the effects of landscape pattern change on flood and low flow based on SWAT model LIN Bingqing, CHEN Xingwei, CHEN Ying, et al (1772)
- Phenological variation of alpine grasses (Gramineae) in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China during the last 20 years XU Weixin, XIN Yuanchun, ZHANG Juan, et al (1781)
- Landscape aesthetics in different areas of Lijiang City GUO Xianhua, ZHAO Qianjun, CUI Shenghui, et al (1794)
- Temporal and spatial pattern of *Scenedesmus* in the river web of the Pearl River Delta, China WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (1800)

- Spatiotemporal dynamics of bacterial abundance and related environmental parameters in Lake Bosten WANG Bowen, TANG Xiangming, GAO Guang, et al (1812)
- Scale domain recognition for land use spatial fractal feature based on genetic algorithm WU Hao, LI Yan, SHI Wenzhong, et al (1822)
- Relationships of stable carbon isotope of *Abies faxoniana* tree-rings to climate in sub-alpine forest in Western Sichuan JIN Xiang, XU Qing, LIU Shirong, et al (1831)
- An exploratory spatial data analysis-based investigation of the hot spots and variability of *Ommastrephes bartramii* fishery resources in the northwestern Pacific Ocean FENG Yongjiu, CHEN Xinjun, YANG Mingxia, et al (1841)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Spatial differentiation research of non-use value WTP based on the residents' ecological cognition: taking the sanjiang plain as a case GAO Qin, AO Changlin, CHEN Hongguang, et al (1851)
- Contamination characteristics in surface water and coastal groundwater of Hunhe River CUI Jian, DU Jizhong, WANG Xiaoguang (1860)
- Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis YU Zhongyuan, LI Bo, ZHANG Xinshi (1870)
- Research Notes**
- Effects of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl stress on growth and physiological characteristics of cucumber seedlings ZHOU Heng, GUO Shirong, SHAO Huijuan, et al (1880)
- View Point**
- The discussion about the designation and content of ecological conservation and construction SHEN Guofang (1891)

《生态学报》2014 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,探索生态学奥秘,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,280 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 魏辅文

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 34 卷 第 7 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 7 (April, 2014)

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