干热河谷水电站路基边坡植被恢复技术研究

穆 军,李占斌,李 鹏,沈中原
(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048)

[摘 要] 【目的】实现干热河谷水电站路基边坡弃渣场的植被恢复,开展保水保肥措施研究,并对其恢复效果进行监测。【方法】以膏桐为供试植物,对植被恢复试验小区土壤分别进行空白对照、保水剂、保水缓释肥、保水剂+保水缓释肥等 4 种处理,在相同管护条件下于 4 个月后观测膏桐生长状况,于 12 个月后观测膏桐的旱季成活率,比较 4 个处理的植被恢复效果。【结果】路基边坡弃渣场土壤采用保水剂、保水缓释肥、保水剂+保水缓释肥处理后,植被恢复效果均好于空白对照,其中保水剂+保水缓释肥处理的植被恢复效果最好。与其他处理相比,保水剂+保水缓释肥处理可以促进膏桐生长发育,提高旱季成活率。与空白处理相比,该处理的株高增长率、叶数增长率、最大叶面积增长率可分别达到 43.50%,53.96%和 17.60%×28.57%(长×宽),平均单株质量增加 37.95%,叶绿素含量增加 6.87%,旱季成活率可达96.38%。【结论】保水剂+保水缓释肥处理在干热河谷水电站路基边坡弃渣场植被恢复中具有一定应用价值。

[关键词] 干热河谷;路基边坡;弃渣场;植被恢复技术
[中图分类号] S727.2;X171.4 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2009)04-0115-06

Study on vegetation restoration technology of subgrade slope of hydropower station in the dry-hot valley areas

MU Jun, LI Zhan-bin, LI Peng, SHEN Zhong-yuan
(*Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: 【Objective】 Study on keeping soil water and nutrient measures in the dry-hot valley areas was done in order to actualize the vegetation restoration of subgrade slope abandoned dreg site of hydropower station. 【Method】 The experiment was carried out through four disposals for the soil of vegetation restoration experimental plot, and the four disposals were blank control, water retaining agent, water retaining and slowly-release fertility and water retaining agent+water retaining and slowly-release fertility. *Jatropha curcas* was planted in the plot. Under the same management conditions, the growth status of *Jatropha curcas* L. 4 months later and dry season survival rate 12 months later were observed in order to compare the effects of the various disposals. 【Result】 The results concluded that the treatments of water retaining agent, water retaining and slowly-release fertility and water-retaining agent + water retaining and slow-released fertilizer achieved good effect compared with blank control. Among them, the best effect was the disposals of water-retaining agent + water retaining and slow-released fertilizer. The treatments could promote the growth of *Jatropha curcas* L. and enhance its survival rate in dry season. The increasing rate of plant height, average leaf number, most leaf area, single weightiness and chlorophyl content increased by 43.50%, 53.96%, 17.60%×28.57% (length×breadth), 37.95% and 6.87% compared with CK. The survival rate of *Jatropha curcas* L. in dry season increased by 96.38%. 【Conclusion】 The treatments of water

* [收稿日期] 2008-10-27
[基金项目] 国家自然科学基金项目(40771124);国家科技支撑计划项目(2006BAD09B02)
[作者简介] 穆 军(1970-),男,陕西兴平人,工程师,在读博士,主要从事生态恢复研究。E-mail:mujunmkl@163.com

retaining agent + water retaining and slow-released fertilizer have certain application value in vegetation restoration of subgrade slope abandoned dreg site of hydropower station in the dry-hot valley.

Key words: dry-hot valley; subgrade slope; abandoned dreg fields; vegetation restoration technology

金沙江干热河谷主要指云南鹤庆中江河口至四川布拖对坪,全长约 880 km 的干流及其支流流域的河谷两侧海拔 1 500 m 以下地区[1]。干热河谷是由特殊地形、气候以及土壤等因子综合作用形成的一种特殊的生态区域,生态脆弱性、植被恢复的困难性是其典型特征。该地区气候干旱炎热,降水量较少且分布不均,特别是旱季持续时间长,蒸发力大等异常干热的气候特点,使其水分亏缺问题较其他干旱、半干旱地区更加突出[2-3],土壤水分缺乏,特别是旱季水热关系的严重失衡,成为干热河谷区植被恢复的最大障碍[4]。加之土壤贫瘠,成为我国植被恢复极端困难的立地之一[5]。

金沙江水能资源极为丰富,水能蕴藏量达1.124亿 kW,约占全国的 16.7%,是全国最大的水电能源基地,也是世界上少有的水能资源富集的河流。在金沙江干热河谷区已规划了若干个大型梯级水电站,使得该地区成为我国水电开发的重要基地。随着我国西南水电能源基地开发建设的逐步实施,将进一步破坏干热河谷地区本已十分脆弱的生态环境,并进而加重该地区的水土流失。金沙江处于长江上游,是保持长江流域生态稳定的生态屏障。保护该地区脆弱的生态环境、减少水土流失、进行有效的植被恢复重建研究,已成为促进当地水电开发与生态环境协调发展的当务之急。已有不少学者对金沙江干热河谷的植被恢复进行了理论和技术研究,并取得了一定的成果[5-9]。但尚未见关于干热河谷水电站弃渣场植被恢复技术的研究报道。为此,本研究针对干热河谷地区路基弃渣场土壤干季水分极为匮乏及土壤十分贫瘠的特征,对弃渣场土壤进行保水保肥研究,并通过现场小区布设,对不同处理的植被恢复效果进行了分析,以期为水电站弃渣场土壤保水保肥技术和植被恢复措施研究提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究地区及试验小区概况

1.1.1 *研究地区概况* 试验点位于金沙江段干热河谷区,属典型的南亚热带干热河谷气候,日照充足,热量丰富。年均温为 18～22 ℃。干、湿季节分明,5～10 月为雨季,11～翌年 4 月为旱季;年平均降雨量为 600～800 mm ,其中 90%以上集中于雨季,年蒸发量在 1 500 mm 以上,可达年降水量的 2 倍左右。该地土壤多为沙性重、砾石含量多的初育土[10]。侵蚀严重,土层浅薄,层次分化不明显,这种极度干热的气候和极差的立地条件,决定了现代自然植被以南亚热带干热河谷稀树灌丛草坡为主,人类活动加速了南亚热带干性常绿阔叶林原生植被向干热河谷草灌的演替进程[11]。因此,改善土壤水分供应条件、选择适宜的造林树种,是干热河谷植被恢复需要解决的技术关键。

1.1.2 *路基边坡弃渣场试验小区概况* 路基边坡弃渣场试验小区海拔为 750 m,坡向东南,面积 90 m^2。小区底层渣石厚度 100～200 cm。将渣石表层处理平整,在平整好的渣石上面覆土,土壤为当地燥红壤,土层厚度 30 cm。覆土后小区坡度约为 25°。

1.2 试验材料

1.2.1 *供试植被* 供试植被为膏桐(*Jatropha curcas* L.),又叫小桐子、麻疯树等,属大戟科(Euphorbiaceae)麻疯树属落叶灌木。在我国,膏桐主要以野生状态分布于云南、四川、广西、海南等省区,喜光、喜暖热气候,不择土壤,耐干旱瘠薄。膏桐是重要的生物质能源树种,种子含油率为 20%～40%,是生产生物柴油的上等原料。

1.2.2 *供试材料* 保水剂,北京桑松农业生态科技有限责任公司提供,系交联聚丙烯酰胺和聚丙烯酸钾盐共聚物,对纯水的最大吸水倍数为 300～500 倍,用量为 1～3 kg/m^3。保水缓释肥,自制,由保水剂和尿素配制而成(先将尿素配成 30%的尿素溶液,再加入 0.3%(尿素质量)的保水剂,在 80 ℃下烘干制成)。经测定该缓释肥初期养分释放率≤15%,28 d 累积养分释放率≤75%,养分释放期的累积养分释放率≥80%。

1.3 试验设计

金沙江干热河谷地区植被恢复的主要障碍是土壤干旱和有机养分的缺乏,由此导致人工植被成活率低或生长不良[9]。试验于 2007-04 在研究区自建的路基边坡弃渣场小区进行。小区渣石覆盖土壤来自退耕地,供试土壤有机质、全氮和全磷含量分别为 9.16,1.07 和 1.05 g/kg。试验共设 4 个处理,即空白对照(CK)、保水剂处理(Ⅰ)、保水缓释肥处理(Ⅱ)和保水剂+保水缓释肥处理(Ⅲ)。每处理 3 次

重复,共 12 个小区。每个小区面积 7.5 m^2。

1.4　试验方法

种植前将小区土壤深翻平整,并去除石块和杂草。在整地后的小区采用穴植法播种膏桐,行株距为 40 cm×40 cm,种植穴为 20 cm×20 cm×20 cm。在处理Ⅰ试验区每穴加入 12 g 保水剂,处理Ⅱ每穴加入 13 g 保水缓释肥,处理Ⅲ每穴同时加入 12 g 保水剂和 13 g 保水缓释肥。先将保水剂或保水缓释肥施入穴中,与土壤混合均匀后再播入种子。每穴放 2 粒膏桐种子。种植完后,浇 1 次水。各区日常管理一致。

2007-08 对每个处理小区膏桐的株高、叶数、叶面积、单株鲜质量和叶片叶绿素含量进行测量。2008-04 对每个处理小区膏桐成活率进行观测。

1.5　测定项目及方法

土壤养分,如土壤有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)含量等的测定采用常规方法[12]进行。土壤含水量测定采用烘干法,采取 15 cm 深土样测定小区土壤含水量,每次设 3 个重复,测定 3 次取平均值;膏桐株高采用直尺测量;鲜质量(地上整株鲜样质量)采用分析天平测定;叶绿素含量采用丙酮法[13]测定。

2　结果与分析

2.1　路基边坡弃渣场土壤水分的月动态变化

土壤水分是环境温度、辐射、降雨及大气蒸发等气象因子综合作用的结果,环境中各气象因子随季节的变化必然导致土壤水分随之发生有规律的变化,土壤水分是植被能否成活的最关键因素之一。对于无人工灌溉的弃渣场,降水是其土壤水分的惟一来源,而温度、光照、辐射、风等气象因子决定了土壤中水分消退的快慢[14-15]。因此,分析掌握弃渣场土壤水分的动态变化,是研究确定相应植被恢复措施的前提。

根据当地气象统计资料和试验测定结果,可得 2007 年度试验地区的降雨量及弃渣场土壤水分随时间的变化如图 1 所示。从图 1 可以看出,2007 年度土壤水分月变化基本呈单峰单谷型,土壤水分的变化表现出先降低、后增加、再降低的变化规律。即 1～4 月土壤含水量逐渐降低,于 4 月达到最低。此后,从 5 月至 10 月,土壤含水量逐渐增加。在此期间,土壤含水量并不是持续增加,而是波动变化。在 5～6 月,土壤含水量急剧增长,6 月土壤含水量比 5 月高出 1 倍以上;与 6 月相比,7、8 月又有小幅降低,于 9 月达到最高;10 月又有小幅减少;从 10 月到 12 月,土壤含水量快速下降。弃渣场土壤水分的上述变化规律,主要与降雨量和蒸发量的年际变化有关。弃渣场所处干热河谷地区,干、湿季节极为分明,雨季从 5 月开始,至 10 月结束。11～4 月为干季,在干季的 6 个月内,降雨次数、降雨量都较少,该期间的降雨对促进植物生长、发育及减缓旱情作用很小,其零星降雨仅能湿润地表土层,由于蒸发强烈,这部分降水在土壤中保存时间极短,多在1～3 d 又被蒸发殆尽。

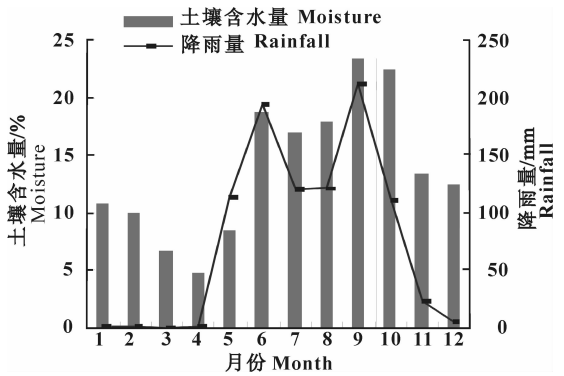

图 1　干热河谷降雨及路基边坡弃渣场土壤水分含量的月动态变化

Fig. 1　Monthly changes of rainfall and soil moisture at the abandoned dreg site in the dry-hot valley

2.2　路基边坡弃渣场不同保水保肥处理对膏桐生长的影响

不同保水保肥处理对膏桐生长发育的影响结果如表 1 所示。由表 1 可知,在 4 种不同处理条件下,膏桐生长的表现各不相同。处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的株高、平均叶数和最大叶面积均高于空白对照处理,其中处理Ⅲ对膏桐生长发育的影响最为显著,其株高增长率、叶数增长率、最大叶面积增加幅度最高,分别达到 43.50%,53.96%和 17.60%×28.57%(长×宽)。而处理Ⅰ虽优于空白对照,但增幅不是太大,表明保水剂处理对膏桐生长有一定的促进作用;处理Ⅱ较处理Ⅰ结果好,表明自制的保水缓释肥对膏桐生长的促进作用更为明显。

2.3　路基边坡弃渣场不同保水保肥处理对膏桐鲜质量的影响

由表 2 可以看出,处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ膏桐的鲜质量均高于对照。与空白对照相比,处理Ⅲ对膏桐鲜质量的影响最为明显,其平均单株质量增加 37.95%。处理Ⅰ的鲜质量虽然高于对照,但增加幅度不大;处理Ⅱ的鲜质量大于对照组和处理Ⅰ,同处理Ⅰ相比,处理Ⅱ可使膏桐的单株鲜质量提高 18.85%,表明

保水缓释肥是促进膏桐鲜质量增加的主因。从不同处理对膏桐鲜质量的影响结果来看,自制保水缓释肥可以增加土壤氮素,提高叶片的光合速率,对植物干物质的积累有积极影响。

表1 不同保水保肥处理对膏桐生长发育的影响

Table 1 Development property of *Jatropha curcas* L. in different disposals

处理 Treatment	株高/cm Plant height	株高增长率/% Growth rate	平均叶数 Leaf number	叶数增长率/% Leaf number growth rate	最大叶面积(长×宽)/cm Maximum leaf area	最大叶面积增长率(长×宽)/% Maximum leaf area growth rate
CK	36.55	—	12.6	—	12.5×10.5	—
Ⅰ	41.78	14.31	14.8	17.46	13.0×11.0	4.0×4.76
Ⅱ	45.64	24.87	16.4	30.16	13.9×12.8	11.2×21.90
Ⅲ	52.45	43.50	19.4	53.96	14.7×13.5	17.60×28.57

表2 不同保水保肥处理对膏桐鲜质量的影响

Table 2 Comparison of different disposals on *Jatropha curcas* L.'sfresh weight

处理 Treatment	单株鲜质量/g Single plant fresh weight	单株鲜质量增长率/% Single plant fresh weight growth rate	处理 Treatment	单株鲜质量/g Single plant fresh weight	单株鲜质量增长率/% Single plant fresh weight growth rate
CK	46.74	—	Ⅱ	59.81	27.96
Ⅰ	50.74	9.11	Ⅲ	64.48	37.95

2.4 路基边坡弃渣场不同保水保肥处理对膏桐叶绿素含量的影响

叶片叶绿素含量直接影响植株的光合能力,进而影响植株的干物质积累。植物体内干物质中,由根部吸收的无机物质所占比例约为10%,而其余90%左右直接或间接地来自光合作用所产生的有机物质[16]。植物的光合作用是在叶绿体内完成的,叶绿素含量与叶片光合速率密切相关[17],叶绿素值大小与产量间也有很密切的关系[18]。Bassham[19]研究认为,可通过提高光合速率增加作物的产量。由表3可见,处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的叶片叶绿素含量均高于对照,其中处理Ⅲ对膏桐叶片叶绿素的影响最为明显,与对照相比,其叶绿素含量增加6.87%。处理Ⅰ的叶绿素含量虽然高于对照,但增加幅度不大;处理Ⅱ的叶绿素含量大于对照组和处理Ⅰ,与处理Ⅰ相比,处理Ⅱ叶片的叶绿素含量提高了62.92%,表明保水缓释肥是促进叶片叶绿素增加的主因。本试验结果表明,3种保水保肥处理由于提高了植株叶片叶绿素含量,从而提高了光合速率,促进了膏桐的生长发育和鲜质量的增加。

表3 不同保水保肥处理对膏桐叶绿素含量的影响

Table 3 Comparison of different disposals on *Jatropha curcas* L.'s chlorophyll content

处理 Treatment	叶绿素含量/(g·g^{-1}) Chlorophyll content	叶绿素含量增长率/% Chlorophyll content growth rate	处理 Treatment	叶绿素含量/(g·g^{-1}) Chlorophyll content	叶绿素含量增长率/% Chlorophyll content growth rate
CK	2.0732	—	Ⅱ	2.1424	3.34
Ⅰ	2.1157	2.05	Ⅲ	2.2156	6.87

2.5 路基边坡弃渣场不同保水保肥处理对膏桐旱季成活率的影响

干热河谷干湿季分明,特别是在干季的3~4月份,降水少,气温高(30℃以上),蒸发量大,导致3月和4月的土壤含水量远低于其他月份,其中4月为全年的最干旱月,而这一时段正是膏桐发芽的关键时期。试验设计的几种处理,是为了掌握不同处理在植被经过1个雨季和旱季后的成活情况,从而找出效果较好的处理措施,以实现干热河谷路基边坡弃渣场植被的恢复。

表4 不同保水保肥处理对膏桐成活率的影响

Table 4 Comparison of different disposals on *Jatropha curcas* L.'s survival rate

处理 Treatment	成活率/% Survival rate	成活率的增长率/% Survival rate growth rate	处理 Treatment	成活率/% Survival rate	成活率的增长率/% Survival rate growth rate
CK	85.34	—	Ⅱ	91.42	7.12
Ⅰ	90.58	6.14	Ⅲ	96.38	12.94

由表4可知,度过1个雨季和旱季后,处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ的成活率均高于对照。与对照相比,处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ成活率的增长率分别为6.14%,7.12%和12.94%,其中处理Ⅲ对膏桐成活率的影响最为明

显。单就成活率的增长率而言,同处理Ⅰ、Ⅱ相比,处理Ⅲ成活率的增长率分别增加 110.75% 和 81.74%,可以看出,处理Ⅲ,即保水剂+保水缓释肥处理能取得较好的植被恢复效果。

3　结　论

1) 路基边坡弃渣场土壤水分的月度变化基本呈单峰单谷型,土壤水分的变化表现出先降低、后增加、再降低的变化规律。4 月的土壤含水率最低,为全年最干旱月。

2) 路基边坡弃渣场植被恢复试验结果表明,保水剂+保水缓释肥处理可以获得较好的植被恢复效果。与对照相比,其膏桐株高增长率、叶数增长率、最大叶面积增加幅度最高,分别达到 43.50%,53.96%和 17.60%×28.57%(长×宽),平均单株鲜质量增加 37.95%,叶绿素含量增加 6.87%,膏桐旱季成活率达 96.38%。

3)采取土壤加入保水保肥材料的措施来促进植株生长发育,提高旱季成活率,可以取得较好的植被恢复效果,该保水保肥措施在干热河谷水电站路基边坡弃渣场植被恢复实践中具有很好的应用价值。

[参考文献]

[1] 张荣祖. 横断山区干旱河谷 [M]. 北京:科学出版社,1996.
Zhang R Z. Dry valley in hengduan mountains [M]. Beijing: Science Press,1996. (in Chinese)

[2] 吴征镒. 云南植被 [M]. 北京:科学出版社,1987:503-509.
Wu Z Y. Yunnan vegetation [M]. Beijing:Science Press,1987: 503-509. (in Chinese)

[3] 王福光,杜天理,雷彻虹. 试论我国西南地区干热河谷荒山造林的问题 [C] //中国林学会编. 造林论文集. 北京:中国林业出版社,1987:45-49.
Wang F G,Du T L,Lei C H. Discussion on the questions of afforestation in southwest dry hot valley of China [C]//Chinese Forestry Society Compilation. Forestation Symposium. Beijing: Chinese Forestry Press,1987:45-49. (in Chinese)

[4] 蒋俊明,费世民,何亚平,等. 金沙江干热河谷植被恢复探讨 [J]. 西南林学院学报,2007,27(6):11-15.
Jiang J M,Fei S M,He Y P. Study on vegetation restoration in dry-hot valleys of the Jinsha river [J]. Journal of Southwest Forestry College,2007,27(6):11-15. (in Chinese)

[5] 张尚云,高　洁,傅美芬,等. 金沙江干热河谷恢复植被与造林技术研究 [J]. 西南林学院学报,1997,17 (2):1-7.
Zhang S Y,Gao J,Fu M F. A study on vegetational restoration and silvicultural techniques in the dry-hot river valley of the Jinshajiang [J]. Journal of Southwest Forestry College,1997, 17(2):1-7. (in Chinese)

[6] 张映翠. 乡土草本植物对干热河谷退化土壤修复的生态效应及机制研究 [D]. 重庆:西南农业大学,2005.
Zhang Y C. Study on ecological effects and mechanisms of soil remediation by restoring native herbage in xerothermic valley region [D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[7] 杨万勤,宫阿都,何毓蓉,等. 金沙江干热河谷生态环境退化成因与治理途径探讨(以元谋段为例) [J]. 世界科技研究与发展,2001,23(3):37-40.
Yang W Q,Gong A D,He Y R,et al. Preliminary investigation on degradation causes and harness approaches of eco environment in dry and hot valley jinsha river-A case from Yuanmou region [J]. World Sci-Tech R&D,2001,23(3):37-40. (in Chinese)

[8] 张建平,杨　忠,张信宝,等. 元谋干热河谷旱地地下地膜隔墙试验初报 [J]. 水土保持通报,2000,20(2):39-40.
Zhang J P,Yang Z,Zhang X B,et al. Underground plastic sheet wall experiment in non-irrigated slope field in yuanmou dry and hot valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2000, 20(2):39-40. (in Chinese)

[9] 张映翠,朱红业,龙会英,等. 金沙江干热河谷退化山地径流塘-草网络技术研究初报 [J]. 水土保持学报,2002,16(4):30-33.
Zhang Y C. Zhu H Y,Long H Y,et al. Technique of runoff interdicting net with low earth bank and grass belt on degenerated hills in hot-arid region of Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2002,16(4):30-33. (in Chinese)

[10] 陈奇伯,王克勤,李金洪,等. 元谋干热河谷坡耕地土壤侵蚀造成的土地退化 [J]. 山地学报,2004,22(5):529-532.
Chen Q B,Wang K Q, Li J H. Land degradation caused by soil erosion of slope in dry-hot valley of Yuanmou county [J]. Journal of Mountain Research,2004,22(5):529-532. (in Chinese)

[11] 张信宝,杨　忠,向国喜,等. 微水造林建设攀枝花市视野区常绿森林植被 [J]. 水土保持学报,2001,15(4):6-9.
Zhang X B,Yang Z,Xing G X. Micro-water harvesting technique to establish ever-green forests in the view area from Panzhihua city urban [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001,15(4):6-9. (in Chinese)

[12] 中科院南京土壤研究所理化室. 土壤理化分析 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1997.
Nanjing Soil Research Institute Physical and Chemical Chamber of the Chinese Academy of Sciences Compilation. Soil physico-chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,1997. (in Chinese)

[13] 西北农业大学. 基础生物化学实验指导 [M]. 西安:陕西科学技术出版社,1985.
Northwestern Agricultural University. Basic Biochemistry Experiment Instruction [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press,1985. (in Chinese)

[14] 张建平. 元谋干热河谷区蒸发量减少原因的关联分析 [J]. 云南地理环境研究,1994,6(2):68-74.
Zhang J P. Grey related analysis on the causes of evaporative reduction of dry-hot valley in yuanmor [J]. Yunnan Geo-

graphic Environment Research, 1994, 6(2): 68-74. (in Chinese)

[15] 王 军,傅伯杰,蒋小平. 土壤水分异质性的研究综述 [J]. 水土保持研究,2002,9(1):1-4.
Wang J, Fu B J, Jiang X P. Review on research of soil moisture heterogeneity [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 1-4. (in Chinese)

[16] 户苅义次. 作物的光合作用与物质生产 [M]. 薛德榕,译. 北京:科学出版社,1979.
Hu Y Y C. Crop Photosynthesis and material production [M]. Xue D R, Translation. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)

[17] 刘贞琦. 水稻叶绿素含量及其光合速率关系的研究 [J]. 作物学报,1984,10(1):57-61.
Liu Z Q. A study on the relation between chlorophyll content and photosynthetic rate of rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 1984, 10(1): 57-61. (in Chinese)

[18] 范淑秀,陈温福. 超高产水稻品种叶绿素变化规律研究初报 [J]. 沈阳农业大学学报,2005,36(1):14-17.
Fan S X, Chen W F. Changes of Chlorophyll Content of High-yielding Rice [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2005, 36(1): 14-17. (in Chinese)

[19] Bassham. Increasing crop production through more controlled photosynthesis [J]. Science, 1977, 197: 630-638.

(上接第114页)

[27] 彭世彰,庞桂斌. 节水灌溉条件下水稻气孔导度模拟模型研究 [EB/OL]. 2008-04-16. http://www.paper.edu.cn.
Peng S Z, Pang G B. Simulation of stomatal conductance of rice under water saving irrigation [EB/OL]. 2008-04-16. http://www.paper.edu.cn. (in Chinese)

[28] 刘颖慧,高 琼,贾海坤. 半干旱地区3种植物叶片水平的抗旱耐旱特性分析——两个气孔导度模型的应用和比较 [J]. 植物生态学报,2006,30(1):64-70.
Liu Y H, Gao Q, Jia H K. Leaf-scale drought resistance and tolerance of three plant species in a semi-arid envioronment: Application and comparison of two stomatal conductance models [J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 64-70. (in Chinese)

[29] 周 莉,周广胜,贾庆宇. 盘锦湿地芦苇叶片气孔导度的模拟 [J]. 气象与环境学报,2006,22(4):42-46.
Zhou L, Zhou G S, Jia Q Y. Simulating leaf stomatal conductance of reed (*Phragmites communis*) plant in Panjin wetland [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(4): 42-46. (in Chinese)

[30] 吉春容,李生秀. 不同株型夏玉米冠层叶片气孔特性的差异 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(5):57-63.
Ji C R, Li S X. Study on change rule of stomata characteristics of different maize types [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2008, 36(5): 57-63. (in Chinese)