

自压喷灌技术在高寒干旱区草地植被恢复的应用浅析

多吉顿珠¹, 巴桑赤烈², 刘玉³

(1. 西藏自治区农牧科学院 草业科学研究所, 拉萨 850009; 2. 西藏自治区水利厅, 拉萨 850000; 3. 中国科学院 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨陵 712100)

摘要:针对高海拔、寒冷和干旱等恶劣气候环境地区草地植被恢复的瓶颈问题,结合可持续发展战略内涵,该研究系统地介绍了高寒干旱区草地自压喷灌技术,采用创新设计,设置围栏、围栏+喷灌、未围栏 3 个处理的初级生产效益对比分析试验。结果显示,围栏封育+自压喷灌样地植物平均高度比未围栏样地增加了 155.77%,比仅围栏样地增加了 76.71%;群落盖度比未围栏样地增加了 152.69%,比仅围栏样地增加了 35.96%;群落生产力比未围栏样地增加了 110.00%,比仅围栏样地增加了 24.10%。结果表明,自压喷灌技术在水源和地形条件具备的高寒干旱草地恢复中具备一定的示范和推广潜力,为西藏地区因地制宜,科学合理地利用水资源,为该区草地生态畜牧业的可持续发展提供了一条新思路。

关键词:自压喷灌; 高寒干旱区; 草地植被; 恢复

中图分类号: S275.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)02-0055-05

Study on Application of Self-Pressure Sprinkler Irrigation Technology to Vegetation Restoration of Alpine Grassland

Duojidunzhu¹, Basangchilie², LIU Yu³

(1. Institute of Grassland Farming, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850009, China; 2. Department of Water Resources, Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With regard to the problems of vegetation restoration in poor natural conditions region, and the connotation of sustainable development, we systematically introduced the application of self-pressure sprinkler irrigation technology using in the alpine grassland. The fenced-irrigated grassland was compared to the free grazing grassland and fenced grassland respectively to analyze the primary productivity. The results showed that the plant height of fenced-irrigated grassland was 155.77% higher than that in the free grazing grassland, and 76.71% more than that in the fenced grassland; the coverage of fenced-irrigated grassland was 152.69% higher than the free grazing grassland, and 35.96% more than the fenced grassland. It indicated that the self-pressure sprinkler irrigation technology had the demonstration and promotion potential in the restoration of grassland vegetation, and provided a new way for the sustainable development of animal husbandry in Tibet.

Keywords: self-pressure sprinkler irrigation; alpine arid areas; Grassland vegetation; Restoration

西藏是我国五大牧区之一,拥有各类天然草地 0.88 亿 hm^2 ,草地及水资源极为丰富,仅地表水资源人均占有水量为全国平均水平的 82 倍^[1]。受特殊的自然地理因素、气候因素等方面影响,水、热资源时空分配不均。而且西藏地区水利基础薄弱,牧区水利研究相对滞后,对草地灌溉工程效益缺乏精确、定量研

究。乃至当前,节水灌溉技术在西藏高寒地区的应用也是一个技术性难题。

水和草是农牧民赖以生存的最重要的物质基础,两者互不可缺,在草地生态畜牧业可持续发展中具有重要地位^[2]。受全球气候变暖等自然因素和不合理利用等人为因素影响,截至 2014 年,西藏地区中度以

上退化草地面积为 1.126 亿 hm^2 , 占可利用天然草地面积的 16.36%, 可灌溉的天然草原面积仅占全区可利用草原面积的 1%^[3-4]。节约用水是我国发展不得不面对的永恒的主题, 它不仅关系到国家粮食安全、生态安全, 而且关乎到国家安全。农业节水将是缓解我国水资源供需矛盾的主要途径^[5-6], 特别是在高寒干旱半干旱草地畜牧业发展区域, 节水灌溉是持续稳产的关键。西藏地区有效灌溉面积增长后劲不足、未来的有效灌溉面积增速可能减慢, 区内也逐渐加强关注农业节水灌溉, 但是自压喷灌草地节水灌溉技术应用研究尚未开展成功^[7-9]。本试验运用自压喷灌技术结合围栏禁牧等措施对高寒草地进行恢复研究, 以期自压喷灌技术在高寒地区的推广应用提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于西藏拉萨市当雄县西南方向, 沿拉日公路向西, 距羊八井镇约 32 km 的格达乡境内, 格达乡向西北约 1.5 km 处的甲多村, 该点位置属于念青唐古拉山西南坡的山脚。平均海拔为 4 500 m。气候属高原寒温带半干旱季风气候。受大气环流和地形影响, 气候特点是冬季寒冷、干燥, 昼夜温差大, 夏季温暖湿润, 雨热同期, 干湿季分明, 天气变化大。根据羊八井气象观测资料分析多年平均气温 1.3℃, 平均气温 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的积温 1 800℃, 地表温度平均为 5.9℃, 每年 11 月至翌年 3 月份有三个月的土地冻结期, 牧草生长期仅 90~120 d。羊八井水文监测站多年平均降雨量 470 mm, 降水主要集中在 7—9 月份, 约占全年的 80% 以上; 多年平均蒸发量 1 725.7 mm; 多年平均年日照时数 2 880.9 h, 年均太阳辐射总量 786.7 $\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$; 多年平均年无霜期仅 62 d。大雪、冰雹、霜冻、干旱、大风等自然灾害频繁。

1.2 天然草地自压喷灌设计

1.2.1 天然草地自压喷灌设计思路 从位于甲多村村庄上游的山脚冲积河床尖溪水出口水 ($29^\circ 58' 20.56''\text{N}$, $90^\circ 14' 51.85''\text{E}$; 海拔 4 747 m), 利用沼泽串沟 (简易土渠) 将水引至村庄旁修建的小型引水口兼沉砂池, 主引水管长 1 295 m, 经主引水管引水至灌区末端, 在主管 0+180 m 处修建容积约 200 m^3 的蓄水池, 在蓄水池设出水口, 在灌溉区形成 35~57 m 的自然高差压力进行草地自压喷灌。为降低高寒、干旱、冻土层自然因素对管网及其他附属设施的影响, 主管和支管全部设埋在冻土层以下, 并建立地下式蓄水池。

1.2.2 灌溉需水量的确定

(1) 设计灌水定额计算公式为^[10]。

$$m = 10.2rh(\beta_1 - \beta_2)/\eta \quad (1)$$

式中: m ——设计灌水定额 (m^3/hm^2); m_0 ——实际灌水定额, $m_0 = 2/3m$ (m^3/hm^2); r ——土壤容重 (g/cm^3); h ——作物根系活动深度 (cm); β_1 ——土壤含水量上限值 (%); β_2 ——土壤含水量下限值 (%); η ——喷洒水利用系数, $\eta = \bar{\rho}_A/(1000q) = 0.8$ 。

试验区土壤容重为 1.7 g/cm^3 , 作物根系活动深度 10 cm, 田间持水量取 30%, 土壤含水量上限取 80%, 下限取 50%, 喷洒水利用系数取 0.8^[10], 故实际灌水定额为 $m_0 = 2/3 \times 10.2 \times 1.7 \times 10 \times 0.3 \times (0.8 \sim 0.5)/0.8 = 195.15 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

考虑到试验区气候干燥、多风的实际气候条件, 选取灌水定额法计算的需水量 195.15 m^3/hm^2 作设计依据。

(2) 灌水周期。

$$T = m/E_{\text{td}} \quad (2)$$

式中: T ——设计灌水周期, 计算值取整 (d); E_{td} ——作物日蒸发蒸腾量, 取代表年灌水高峰期平均值 (mm/d)。

$$E_{\text{td}} = c[wR_n + (1-w) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d)] = 2.68 \quad (3)$$

式中: c ——修正系数, $c = 0.92$; R_n ——太阳静辐射 = 3.68 mm/d , $e_a = 7.15$, $e_d = 7.00$; w ——取决于温度与高程的加权系数, $w = 0.78$; $f(u) = 0.27(1 + u/100) = 1.27$; 灌水周期为 $T = 19.51/0.7/2.68 = 5.1 \approx 5(\text{d})$ 。

(3) 灌水强度。

① 允许喷灌强度。根据《喷灌工程技术规范》(GB/T 50085—2007) 中“各类土壤的允许喷灌强度”规定^[10], 沙壤土的喷灌强度为 15 mm/h , 考虑到本项目区地形的自然坡度等因素, 按照《喷灌工程技术规范》中“坡地允许喷灌强度降低值”规定 (表 1), 降低 20% 的强度, 故选用 12 mm/h 的喷灌强度。

表 1 灌溉需水量经验参数统计

序号	土壤类别	允许喷灌强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$
1	砂土	20
2	砂壤土	15
3	壤土	12
4	壤黏土	10
5	黏土	8

② 喷洒强度的计算:

$$\rho_s = 1000q/\pi R \quad (4)$$

式中: q ——喷头的喷水量; $q = 9.6 \text{ m}/\text{h}$; R ——喷头射程 (m); $R = 26 \text{ m}$; $\rho_s = (1000 \times 9.6)/(3.14 \times 262) = 4.52 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$ 满足。

(4) 雾化指标。

① 允许雾化指标:

根据《节水灌溉工程实用手册》作物雾化指标规定牧草、饲料作物及缘化林木为 2 000~3 000^[11]。

② 雾化指标计算:

$$W_p = H_p / d \quad (5)$$

式中: W_p ——雾化指标; H_p ——喷头工作压力强度(57 m); d ——喷头喷嘴直径 12 mm。 $W_p = (350 \times 100) / 12 = 2197 < 3000$ 。

(5) 水量平衡分析。

来水量: 5 d 需水量:

$$W_j = (m \times s) / d = (19.51 \times 107\,000) / 0.7 = 2\,982 \text{ m}^3 / \text{t}$$

5 d 来水量:

$$0.054 \times 86\,400 \times 5 = 23\,328 \text{ m}^3$$

需水量:

$$Q_j = m_A / T_i \eta = (19.51 \times 107\,000) / (1000 \times 3600 \times 5 \times 9) = 0.013 \text{ m}^{3\text{S}-1} < 0.054 \text{ m}^{3\text{S}-1}$$

平衡分析, 来水量大于需水量满足要求。

1.2.3 喷灌工作制度

(1) 设计喷水时间:

$$t_d = ms / 1000QT\eta \quad (6)$$

式中: t_d ——日喷灌时间(h); m ——设计灌水定额(m^3/hm^2), $m = 19.51 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; s ——系统控制面积, $s = 107\,000 \text{ m}^2$; Q ——系统流量, $Q = 48 \text{ m}^3/\text{h}$; T ——设计灌水天数, $T = 5 \text{ d}$; η ——喷洒灌水利用系数, $\eta = 0.7$;

$$t_d = (19.51 \times 107\,000) / (1000 \times 48 \times 5 \times 0.7) = 12.43 \text{ h}$$

(2) 喷头在工作点的喷洒时间:

$$t = dbm / 1000q\eta \quad (7)$$

式中: t ——喷头在工作点上喷洒的时间(h); a ——喷头沿支管的间距(m), $a = 21 \text{ m}$; b ——支管的布置间距 m , $m = 21 \text{ m}$; q ——喷头流量 m^3/h , $q = 9.6 \text{ m}^3/\text{h}$; η ——喷洒水利用系数, $\eta = 0.7$ 。

$$t = (21 \times 21 \times 19.51) / (1000 \times 9.6 \times 0.7) = 1.28 \text{ h}$$

(3) 每日可喷洒的工作位置轮换数:

$$n \leq t_d / t \quad (8)$$

式中: n ——每日可喷洒的工作位置轮换数; t_d ——每日喷灌作业时间, $t_d = 12.43 \text{ h}$; t ——喷头在工作点上喷洒的时间(h), $t = 1.28 \text{ h}$ 。

$$n = 12.43 / 1.28 = 9.71, \text{取 } 10 \text{ 次。}$$

根据实际情况,主管道长约 1 295 m,基本沿等高线垂直方向布置,每条支管长约 300 m,也基本垂直等高线走势与主管道呈直角布置,主管与支管将采用“梳齿型”方式布设。设支管 20 条,支管最多设 15 个喷头,每个喷头灌水强度初步选为 12 mm/h。灌水周期为 5 d。

1.2.4 喷头的选择 喷头的选取与喷灌强度有直接

的关系,按照《节水灌溉工程技术规范》中的规定^[12],土壤的允许喷灌强度是影响喷头选型的主要因素之一。一般情况下,喷头选择宜优先采用低压喷头;灌溉季节风大的地区或实施树下喷灌的喷灌系统,宜采用低仰角喷头;草坪宜采用地埋式喷头;同一轮灌区内的喷头宜选用同一型号。喷头组合喷灌强度的计算公式为:

$$\rho_{\text{组合}} = 1000q/A \quad (9)$$

式中: q ——单喷头的流量(m^3/h); A ——单喷头的有效控制面积(m^2)。

按照 $q = 9.6 \text{ m}^{3\text{S}-1}$, $A = 1385$ 计算,则 $\rho_{\text{组合}} = 6.93$ (mm/h) $< 12 \text{ mm}/\text{h}$,可以满足沙壤土要求。选喷头 40Py2H-270,其喷嘴直径 12 mm,压强 350 kPa, $q = 9.6 \text{ m}^3/\text{h}$,射程 26 m。

1.2.5 喷头的布置 由于本项目区域地块不平,且有一定的自然坡度,边界要求也不高,故本次设计采用不规则形。喷头及支管间距计算公式:

$$a = b = K_b \quad (10)$$

式中: a ——喷头在支管上的间距(m); b ——支管间间距(m); K_b ——与喷灌系统的形式、风速,等有关的系数, $K_b = 0.81$; R ——喷头的射程(产品性能表上查的数值), $R = 26 \text{ m}$ 。 $a = b = 21 \text{ m}$ 。参照灌溉工程相关技术规程,结合本项目实际,喷头及支管间距设在 21 m。

1.3 自压喷灌试验设计

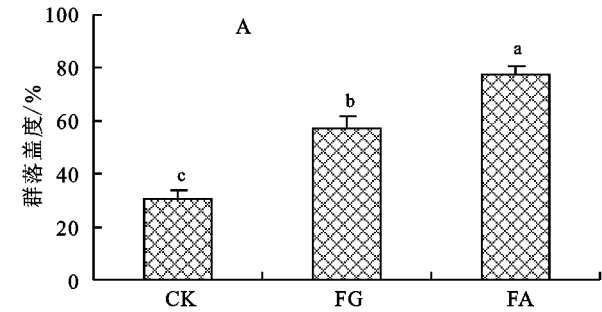
在 2012 年 11 月 1 日首次试喷成功的在天然草地喷灌灌溉区域内,设置面积为 $21 \text{ m} \times 21 \text{ m}$ 的样地 3 个,依次为围栏禁牧处理(FG)、围栏+喷灌处理(FA)和围栏外对照区(CK)。喷灌试验从 2013 年 5 月份开始,每月喷 3 次。2013 年 9 月份,在每个样地对角线上随机选择 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 样方 5 个进行群落调查。记录样方内的植被种类、总盖度、分盖度、自然高度。采用刈割法测定群落地上生物量,在实验室烘箱内于 70°C 下烘至恒重,测定植物干重。土壤样品采用对角线混合法采集 0~10 cm 土壤样品每样方 3 次重复,同样方同土层混合,风干研磨后过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用^[13]。土壤有机质测定采用重铬酸钾外加热法,速效氮用碱解蒸馏法测定,土壤群落采用酸溶—钼锑抗比色法测定,土壤全氮采用半微量凯氏法测定,土壤 pH 采用复合电极法测定^[14]。

数据采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行数据整理及相关的统计分析。通过单因子方差分析(One-way ANOVA)比较不同处理间盖度及生物量差异。

2 结果与分析

不同处理的方差分析结果表明,围栏+喷灌草地

群落盖度相比围栏草地和未围栏草地群落的盖度显著增加($p<0.05$)。围栏+喷灌样地群落盖度比未围栏样地增加了 152.69%，比仅围栏样地增加了 35.96% (图 1A)。围栏+喷灌样地群落中植物平均高度比未围栏和围栏样地也显著增加($p<0.05$)，比未围栏样地增加了 155.77%，比仅围栏样地增加了 76.71% (图

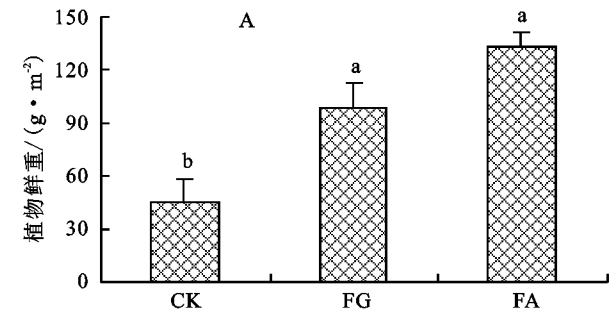


注:CK 为围栏外对照样地;FG 为围栏封育样地;FA 为围栏+喷灌样地。不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同。

图 1 不同处理间群落盖度、植物平均高度变化

围栏+喷灌草地群落植物鲜重和干重生物量均比围栏草地和未围栏草地群落的生物量显著增加($p<0.05$)。围栏+喷灌样地群落植物鲜重比未围栏样地增加了 192.88%，比仅围栏样地增加了 34.82% (图 2A)。围栏+喷灌样地群落中植物干重比未围栏和围栏样地也显著增加($p<0.05$)，比未围栏样地植物干重增加了 110.00%，比仅围栏样地增加了 24.10% (图 2B)。

研究表明，作物产量与水分消耗量呈线性关系，

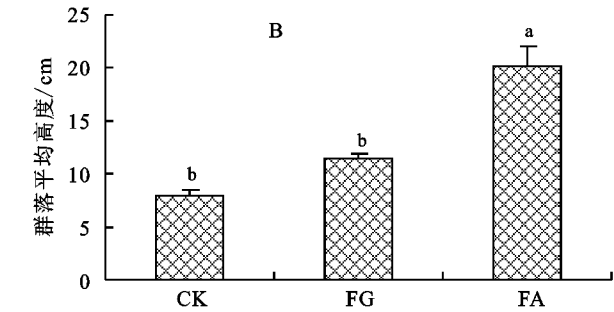


由表 3 可以看出，围栏+喷灌样地 pH、有机质、全钾、速效氮含量均低于围栏和未围栏样地，但全氮含量高于围栏和未围栏样地。全磷含量表现为对照>围栏+喷灌>围栏样地。一方面，灌溉使得土壤水分增加，一些钾、钠、钙、镁、铁等盐的盐基发生淋溶

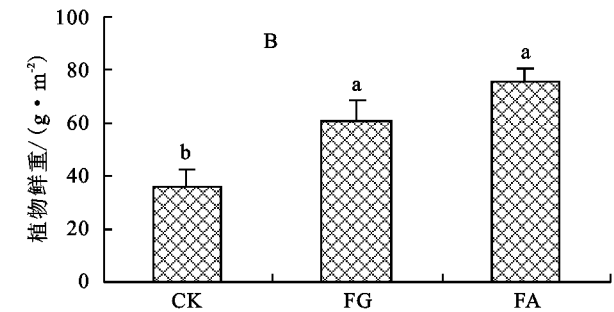
处理	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)
FG	7.47±0.58	24.73±4.67	0.95±0.11	0.31±0.07	30.62±3.27	144.63±18.47
FA	6.75±0.96	10.79±3.39	1.00±0.08	0.40±0.13	28.26±2.11	94.38±18.55
CK	7.28±0.35	11.85±4.88	0.53±0.05	0.43±0.11	37.83±2.73	99.13±16.34

注:CK 为围栏外对照样地;FG 为围栏封育样地;FA 为围栏+喷灌样地。

1B)。灌溉样地的植被盖度，株高明显高于对照样地，表明灌溉对于高寒干旱区草地植被恢复的作用十分明显，这与高天明^[15]、景美玲等^[16]研究结果相同。灌溉可以补充天然降水的不足，改善草地生态环境进而促进牧草生长，尤其是在西藏的高寒干旱地区灌溉对于植物生长的水分补充显得尤为重要。



灌溉对作物产量有重要影响，有灌溉条件的农作物产量是无灌溉条件产量的 1~2 倍^[9]。国内外生产和实践证明，灌溉可以使天然草地产量提高 8~10 倍^[16]，由于高寒地区气候条件的影响，特别是温度的限制，本试验中灌溉样地相比对照样地植物鲜重提高了 1.9 倍，植物干重提高了 1.1 倍。可见，适当发展灌溉草业，可大幅度增加单位面积产草量和牧草质量，提高草地综合生产力，减轻草地放牧压力，促进退化草地自然恢复^[17]。



现象或者随水流失；另一方面灌溉使得植物生长所需的水分得到相应补充，土壤溶液反应发生改变，牧草生长环境得到改善，良好的生长需要吸收土壤中大量的养分，因此土壤中 pH、有机质、全钾、速效氮含量降低。

表 2 不同处理间土壤理化性质变化

处理	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	速效氮/(mg·kg ⁻¹)
FG	7.47±0.58	24.73±4.67	0.95±0.11	0.31±0.07	30.62±3.27	144.63±18.47
FA	6.75±0.96	10.79±3.39	1.00±0.08	0.40±0.13	28.26±2.11	94.38±18.55
CK	7.28±0.35	11.85±4.88	0.53±0.05	0.43±0.11	37.83±2.73	99.13±16.34

3 结论

本试验在西藏高寒干旱区利用自压喷灌技术进行草地恢复管理研究,结果表明,围栏封育+自压喷灌样地植物平均高度比未围栏样地增加了155.77%,比仅围栏样地增加了76.71%;围栏+喷灌样地群落盖度比未围栏样地增加了152.69%,比仅围栏样地增加了35.96%;群落生产力比未围栏样地增加了110.00%,比仅围栏样地增加了24.10%。自压喷灌技术在西藏高寒干旱地区自压喷灌技术显著提高草地群落的盖度和高度,使草地生产力显著增加。自压喷灌技术在水源和地形条件具备的高寒干旱草地恢复中具备一定的示范和推广潜力,为西藏地区因地制宜,科学合理地利用水资源,为该区草地生态畜牧业的可持续发展提供了一条新思路。

参考文献:

- [1] 张文贤,张展羽,杨永红. 西藏地区农业水资源利用与节水农业发展对策[J]. 水资源保护,2005,21,(5):62-65.
- [2] 张玉云,西藏区域水资源开发利用探讨[J]. 地下水,2014,36(5):87-88.
- [3] 甘红,刘彦随,李宪文. 区域土地利用变化与水资源利用相关分析[J]. 南京师大学报:自然科学版,2003,26(3):82-88.
- [4] 成升魁,沈镭. 青藏高原人口、资源、环境与发展互动关系探讨[J]. 自然资源学报,2000,15(4):297-304.
- [5] 边多,李春,杨秀海,等. 藏西北高寒牧区气候特征及草地

退化原因分析[J]. 自然资源学报,2008,23(2):254-262.

- [6] 逢焕成. 我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析[J]. 中国土壤与肥料,2006(5):1-6.
- [7] 李影,张磊. 喷灌技术在西藏当雄县贡塘草场节水灌溉工程中的应用[J]. 西藏科技,2013(3):8-12.
- [8] 卢勇,王庆元. 自压喷灌技术在人工草场灌溉中的应用[J]. 节水灌溉,2015(3):45-47.
- [9] 冉清红,岳云华,屈波,等. 西部耕地有效灌溉发展及影响因素的省区分异[J]. 水土保持研究,2015,22(4):241-246.
- [10] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 喷灌工程技术规范[M]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [11] 中华人民共和国农村水利司,中国灌溉排水发展中心. 节水灌溉工程实用手册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [12] 中华人民共和国水利部. 节水灌溉工程技术规范[M]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [13] 马佳慧,张兴昌,邱莉萍. 黑岱沟矿区土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. 水土保持研究,2015,21(1):93-96.
- [14] 张桃林,潘剑君,赵其国. 土壤质量研究进展与方向[J]. 土壤,1999(1):1-7.
- [15] 高天明,张瑞,刘昭. 希拉穆仁草地退化机理及各种修复技术的适用性[J]. 草业科学,2010,27(1):42-46.
- [16] 景美玲,马玉寿,张金旭,等. 黑土滩人工草地植物群落及土壤水分对灌溉的响应[J]. 江苏农业科学,2013,41(11):388-391.
- [17] 荣浩,刘艳萍. 草原生态建设与草地灌溉耦合效应研究[J]. 水土保持研究,2005,12(1):156-158.

(上接第54页)

- [18] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, et al. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China[J]. Plant Ecology, 2007, 188(1): 77-89.
- [19] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, et al. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China[J]. Plant and Soil, 2011, 347(1-2): 243-253.
- [20] Fonseca W, Benayas J M R, Alice F E. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(8): 1400-1408.
- [21] Wang H, Liu S R, Mo J M, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of

indigenous tree species in subtropical China[J]. Ecological Research, 2010, 25(6): 1071-1079.

- [22] Jug A, Makeschin F, Rehfuss K, et al. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany: III. Soil ecological effects[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 121(1/2): 85-99.
- [23] Schleuß P-M, Heitkamp F, Leuschner C, et al. Higher subsoil carbon storage in species-rich than species-poor temperate forests[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(1): 14007-14009.
- [24] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2610-2617.