基于主成分分析的片麻岩山地新栽幼树不同保水措施评价

刘 洋[1,2], 赵 爽[1,2], 李 寒[1,2], 齐国辉[1,2], 张雪梅[1,2], 郭素萍[1,2]

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省核桃工程技术研究中心, 河北 临城 054300)

摘 要: [目的] 探索北方退化干旱山地新栽幼树适宜的土壤保水措施,为北方干旱退化山地发展高效节水经济林产业提供科学依据。[方法] 以 2 年生"绿岭"核桃嫁接幼树为试材,进行保水剂、秸秆覆盖和地膜覆盖等保水措施的不同组合处理,研究不同保水措施对土壤环境状况及新栽核桃幼树生长的影响,并采用主成分分析法对保水措施进行科学的综合评价。[结果] 用土壤理化性质、土壤微生物数量和新栽幼树生长状况 3 个层次的 17 个指标构建了片麻岩山地新栽幼树保水措施的筛选模型,将原始数据标准化,提取出了 4 个主成分,可反映保水措施 93.453%的综合效果。[结论] 地膜覆盖是片麻岩山地新栽幼树最佳的保水措施。

关键词: 核桃; 保水措施; 主成分分析; 综合评价

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2017)05-0284-06 **中图分类号**: S152.7+1

文献参数: 刘洋, 赵爽, 李寒, 等. 基于主成分分析的片麻岩山地新栽幼树不同保水措施评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 284-289. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.048; Liu Yang, Zhao Shuang, Li Han, et al. Evaluation of water conservation measures on newly planted trees in gneiss mountain based on principal component analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 284-289. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.048

Evaluation of Water Conservation Measures on Newly Planted Trees in Gneiss Mountain Based on Principal Component Analysis

LIU Yang[1,2], ZHAO Shuang[1,2], LI Han[1,2],
QI Guohui[1,2], ZHANG Xuemei[1,2], GUO Suping[1,2]

(1. *College of Forestry, Heibei Agricultural University, Baoding, Heibei* 071000, *China*;
2. *Research Center for Walnut Engineering and Technology of Hebei, Lincheng, Heibei* 053400, *China*)

Abstract: [Objective] To find out suitable soil water conservation measures in arid and degradation mountain regions in North China, in order to provide scientific basis for the development of efficient water-saving forest industry in the northern arid degraded mountainous areas. [Methods] Two years old "Lüling" grafted walnut seedlings were used as materials to study the effects of different combinations of aquasorb, straw and plastic film mulching on soil environment and growth of newly planted young walnut trees. Principal component analysis was used for the comprehensive evaluation of water conservation measures. [Results] Seventeen indices of physical and chemical properties of soil, soil microbial quantity and newly planted tree growth status were used to construct the screening model of water conservation measures on newly planted trees in gneiss mountains. Using the standardized data, four principal components were extracted from 17 indices, which can explain 93.453% of the comprehensive effect of water conservation measures. [Conclusion] The plastic film mulching is the best water conservation measure for newly planted tree in gneiss mountains.

Keywords: **walnut; water conversation measures; principal component analysis; comprehensive evaluation**

收稿日期: 2017-04-10 **修回日期**: 2017-04-27

资助项目: 林业公益性行业科研专项经费项目"太行山干旱退化山地旱涝灾害生态调控技术研究"(201504408); 河北省科技计划项目"河北省山区核桃近自然生产技术创新与示范"(16236810D)

第一作者: 刘洋(1991—),男(汉族),河北省高阳县人,博士研究生,主要研究方向为经济林栽培生理。E-mail: 1203110893@qq.com。

通讯作者: 齐国辉(1969—),女(汉族),河北省遵化市人,博士,教授,主要从事经济林栽培教学及科研工作。E-mail: bdqgh@sina.com。

中国是一个严重干旱缺水的国家,淡水资源总量为 2.80×10^{12} m^3,占到全球淡水资源的 6%,但是由于人口众多,人均拥有淡水资源仅为世界平均水平的 1/4,是全球人均水资源最贫乏的国家之一[1-2],这种状况于北方山区更加严峻。发展经济林产业是带动北方山区农民脱贫致富的有效途径,但北方山区水资源匮乏是发展经济林产业的主要制约因素。因此,如何提高山区水资源利用率是解决这一问题的关键所在。土壤保水措施能够有效地减少土壤水从地表蒸发散失,是水资源高效利用的有效途径。在北方干旱山地栽植果树或种植农作物时施用保水剂[3-6],采取地面覆盖等[7-9]措施可以有效减少土壤水分蒸发,提高水分利用效率,还具有调节地表温度[10-11],改善土壤理化性状[12],防止水土流失[13]的作用,并可以显著提高栽植成活率,促进植物生长发育。但目前关于保水措施研究多是针对不同保水处理之间保水效果的研究,在这些研究中,我们可以了解到某个保水措施的优缺点,但关于如何评价保水措施优劣的研究还未见报道。为了探索北方片麻岩山地果园适宜的土壤保水模式,本试验拟以 2 年生"绿岭"核桃嫁接幼树为试材,研究不同保水措施组合对土壤环境及新栽核桃幼树生长的影响,从土壤理化性质、土壤微生物数量和新栽核桃幼树生长状况等 3 个指标层次,运用主成分分析法综合评价不同保水措施的效果,以期为北方干旱退化山地发展高效节水经济林产业提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地设在河北省中部太行山东麓、滹沱河上游的平山县银泰葫芦峪农业科技开发有限公司的核桃生产基地。地理位置为东经 114°5′38″—114°7′33″,北纬 38°26′5″—38°27′47″。该地区属暖温带半干旱季风大陆性气候,年平均气温 12.7 ℃,年较差 29.5 ℃。无霜期 170～183 d,年太阳辐射总能量为 548～582 kJ/cm^2,多年平均日照时数 2 611 h,年有效积温 4 853.5 ℃。多年平均降水量 543.3 mm,多年平均汛期降水量 430 mm,占全年降水量的 70.6%。多年平均水面蒸发量 1 815.4 mm,年平均干燥度1.38。

1.2　试验设计与试验方法

试验以 2 年生"绿岭"核桃嫁接幼树为试材。试验设清耕(CK)、栽植坑内施用保水剂(以下简称保水剂)、秸秆覆盖(以下简称秸秆)、地膜覆盖(以下简称地膜)、栽植坑内施用保水剂＋秸秆覆盖(以下简称保＋秸)、栽植坑内施用保水剂＋地膜覆盖(以下简称保＋地)、秸秆覆盖＋地膜覆盖(以下简称秸＋地)、栽植坑内施用保水剂＋秸秆覆盖＋地膜覆盖(以下简称保＋秸＋地),共 8 个处理。每处理每个小区 30 株树,采用随机区组排列,3 次重复。2015 年 3 月 24 日栽植。保水剂为从北京汉力森新技术有限公司购进的 XL 型保水剂(粒径 4～6 mm),施用量 20 g/株;秸秆为花生壳,覆盖厚度 10 cm;地膜为普通农用黑色 PE 薄膜。栽植前每个栽植坑内施入 25 kg 腐熟鸡粪,与土壤充分混匀。采用小管出流节水灌溉系统进行灌水,灌溉次数由土壤含水量决定,在土壤容积含水量低于 20%(长时间低于此含水量会导致核桃幼树缺水而死)时对相应处理的核桃树进行补水灌溉,每次灌水量为 25 kg/株。

1.3　测定内容及方法

土壤容积含水量:采用 TRIME-T3 TDR 土壤含水量测量系统进行测定,从 4 月份开始,每 10 日测定 1 次。并计算其生长期均值。

(1) 成活率。在 9 月份,统计不同保水措施处理下的核桃幼树的成活株数,计算成活率。

(2) 新梢长度。在不同处理中随机选取 5 棵树,从核桃幼树萌芽起到落叶前,每 10 d 测定一次全树所有新梢的长度。

(3) 土壤理化性质测定。土壤水分采用烘干法;土壤 pH 值采用电位计法测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法;全氮采用凯氏定氮法;全磷采用钼锑抗比色法;速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;全钾和速效钾采用原子吸收分光光度法[14]。

(4) 土壤微生物数量测定。土壤微生物采用平板计数法,细菌、真菌、放线菌、纤维素分解菌所用培养基分别为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基、马丁氏培养基、高氏 1 号培养基、CMC-Na 琼脂培养基。

1.4　数据分析方法

采用主成分分析法[15]建立保水措施效果综合评价模型。设反映保水措施综合评估值的 p 个指标为 $X_1, X_2, \cdots, X_p$,n 个保水措施的 p 项指标构成了原始数据矩阵 $X=[X_{ij}]_{n\times p}$,其中 X_{ij} 为第 i 个保水措施的第 j 项指标数据($i=1,2,\cdots,n$; $j=1,2,\cdots,p$)。

(1) 原始数据标准化,目的是为了消除量纲和数量级的影响。

$$X_{ij}^{*}=(X_{ij}-\overline{X}_j)/S_j \tag{1}$$

式中:X_{ij}^{*}——X_{ij} 的标准化数据; $\overline{X}_j$, S_j——第 j 个指标的平均值和标准差。

(2) 确定主成分,将标准化的数据用 SPSS 软件处理,从总方差分析表选取累计贡献率≥85%的前 m

个主成分，然后建立 m 个主成分和标准化变量的关系，公式为：

$$Y_k = u_{k1}X_1^* + u_{k2}X_2^* + \cdots + u_{kp}X_p^* \quad (2)$$

式中：Y_k——第 k 个主成分（$k=1,2,3,\cdots,m$）；u_{k1}——第 k 个主成分的因子荷载。

（3）确定权重，用第 k 个主成分的贡献率与选取的 m 个主成分的总贡献率的比值来确定每个主成分的权重：

$$w_k = \lambda_k / \sum_{k=1}^{m} w_k Y_k \quad (3)$$

式中：w_k——第 k 个主成分的权重；λ_k——第 k 个主成分的贡献率。

（4）构造综合评价函数，根据式(2)得到的前 m 个主成分和式(3)中确定的权重构造综合评价函数：

$$F = \sum_{k=1}^{m} w_k Y_k \quad (4)$$

式中：F——保水措施综合评价得分，综合得分越高，表明此种保水措施的综合效果越好。

2 结果与分析

2.1 不同保水措施的单项指标评价

本研究中保水措施采用了保水剂、秸秆和地膜 3 种保水材料，运用不同组合对片麻岩山地新栽核桃幼树进行保水处理。为了综合评价每个保水措施的效果，选取土壤理化性质、土壤微生物数量和新栽核桃幼树生长状况作为评价指标。在对各评价指标进行主成分分析前首先要用式(1)对各个指标做标准化处理，处理结果见表 1—3。

从土壤物化性质角度来看，采用保水措施后，土壤含水量均有不同程度的提高，所施用的措施越多，土壤含水量越高；总体来看，保水措施均可以改善土壤环境状况，各保水措施对土壤密度、孔隙度的影响程度不尽相同；地膜覆盖在促进幼树快速生长，加速了土壤中的营养消耗，故土壤养分有所降低，秸秆覆盖后，腐烂后会增加土壤养分含量。

从微生物角度看，土壤微生物有助于土壤粒子形成大的团粒结构，对土壤的形成和发育有密切关系。还可以分解有机质和矿物质，增加土壤可利用养分含量，进而促进林木生长。故微生物情况也应作为反映保水措施优劣的指标。由表 3 可见，有地膜覆盖而没有秸秆覆盖的处理（地膜和保＋地）的土壤微生物数量低于对照，有秸秆覆盖的处理（秸秆、保＋秸、秸＋地、保＋秸＋地）土壤微生物数量均高于对照，说明地膜覆盖对微生物的繁殖有一定抑制作用，秸秆覆盖促进了微生物的繁殖发育。

从新栽幼树生长角度来看，保水措施实施的目的是为了节水，但前提却是在保证成活率和幼树正常生长。所以新栽幼树的生长情况对评价保水措施的效果至关重要。好的保水措施不仅可以提高新栽幼树成活率，还应该最大地增加生长量。在本试验中，有地膜覆盖而没有秸秆覆盖的处理增加了新栽核桃幼树的成活率，其中保＋地处理的成活率最高，有秸秆覆盖的处理因为阻碍了地温升高使新栽核桃幼树成活率降低；所有保水措施均可以增加新栽幼树的新梢生长量，不同措施之间差异显著，保＋秸处理的新栽核桃苗的新梢长度最大。

表 1 不同保水措施的土壤物理性质标准化数据

处 理	土壤密度/（g·cm^{-3}）	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤含水量/%
CK	1.637	−1.556	−0.483	−1.750	−1.629
保水剂	−1.169	1.023	1.253	−0.144	−1.472
秸 秆	0.234	−0.188	0.602	−1.145	0.134
地 膜	0.234	−0.188	−0.456	0.347	0.357
保＋秸	−1.637	1.786	1.524	0.668	0.299
保＋地	0.234	−0.345	−1.202	1.141	0.460
秸＋地	0.234	−0.345	−0.402	0.026	0.836
保＋秸＋地	0.234	−0.188	−0.836	0.857	1.016

表 2 不同保水措施的土壤化学性质标准化数据

处 理	有机质含量/（g·kg^{-1}）	全氮含量/（g·kg^{-1}）	全磷含量/（g·kg^{-1}）	全钾含量/（g·kg^{-1}）	有效磷含量/（mg·kg^{-1}）	速效钾含量/（mg·kg^{-1}）
CK	−0.229	−0.603	−0.303	0.331	−0.757	−0.656
保水剂	−0.986	−1.042	−1.110	−0.363	−0.890	−0.848
秸 秆	1.699	0.274	1.715	1.431	1.308	0.483
地 膜	−0.313	−1.042	−0.706	−0.135	−0.618	−0.477
保＋秸	0.272	0.713	0.706	0.745	0.598	1.686
保＋地	−1.512	−0.823	−1.110	−0.502	−0.937	−1.193
秸＋地	0.357	1.371	0.706	0.419	1.504	1.059
保＋秸＋地	0.711	1.152	0.101	−1.926	−0.208	−0.054

表 3　不同保水措施的土壤微生物和新栽核桃树生长状况标准化数据

处 理	细菌数量/(10^{-7} · g^{-1})	真菌数量/(10^{-4} · g^{-1})	放线菌数量/(10^{-6} · g^{-1})	纤维分解菌数量/(10^{-5} · g^{-1})	核桃幼树成活率/%	新梢长度/cm
CK	−0.081	1.722	−0.028	0.732	−0.196	−1.299
保水剂	0.027	−0.184	−0.928	0.081	0.658	−1.138
秸 秆	0.786	0.509	0.946	−0.765	−1.476	0.704
地 膜	−1.762	−0.271	−1.377	−1.351	1.085	−0.542
保+秸	0.949	0.639	1.321	−0.114	−0.622	1.205
保+地	−1.220	0.119	−1.003	−1.025	1.511	−0.597
秸+地	0.515	−1.397	0.422	1.253	−0.622	0.717
保+秸+地	0.786	−1.137	0.647	1.188	−0.338	0.951

2.2　基于主成分分析的不同保水措施的综合评价

将标准化数据进行主成分分析,总方差分析见表 4。前 4 个主成分的累计贡献率为 93.453%(大于 85%),选取前 4 个主成分就足以反映所需要的评价信息。所提取的前 4 个主成分的因子荷载见表 5。其中第 1 个主成分因子荷载量较大的指标有有机质含量、全氮含量、全磷含量、有效磷含量、速效钾含量、细菌数量、放线菌数量、成活率、新梢长度;第 2 个主成分因子荷载量较大的指标有土壤含水量、非毛管孔隙度、全钾含量、真菌数量;第 3 个主成分因子荷载量较大的指标有土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度;第 4 个主成分因子荷载量较大的指标为纤维分解菌数量。

表 4　标准化数据的总方差分析

主成分	初始特征向量		
	特征值	方差贡献/%	累积贡献率/%
1	8.074	47.497	47.497
2	3.421	20.123	67.620
3	2.880	16.942	84.562
4	1.511	8.891	93.453
5	0.565	3.326	96.779
6	0.426	2.503	99.282
7	0.122	0.718	100
8	1.00E−13	1.02E−13	100
9	1.00E−13	1.02E−13	100
10	1.00E−13	1.02E−13	100
11	1.00E−13	1.01E−13	100
12	1.00E−13	1.01E−13	100
13	1.00E−13	1.00E−13	100
14	−1.00E−13	−1.00E−13	100
15	−1.00E−13	−1.01E−13	100
16	−1.00E−13	−1.01E−13	100
17	−1.00E−13	−1.03E−13	100
主成分	因子提取结果		
	特征值	方差贡献/%	累积贡献率/%
1	8.074	47.497	47.497
2	3.421	20.123	67.620
3	2.88	16.942	84.562
4	1.511	8.891	93.453

表 5　因子载荷

指 标	主成分			
	1	2	3	4
土壤密度/(g · cm^{-3})	−0.263	−0.49	−0.818	0.126
总孔隙度/%	0.305	0.461	0.825	−0.111
毛管孔隙度/%	0.408	−0.176	0.860	−0.187
非毛管孔隙度/%	−0.098	0.964	0.092	0.087
土壤含水量/%	0.420	0.707	−0.348	0.441
有机质含量/(g · kg^{-1})	0.847	−0.231	−0.212	0.163
全氮含量/(g · kg^{-1})	0.873	0.282	−0.341	−0.155
全磷含量/(g · kg^{-1})	0.928	−0.245	−0.085	0.250
全钾含量/(g · kg^{-1})	0.393	−0.614	0.381	0.462
有效磷含量/(mg · kg^{-1})	0.903	−0.045	−0.077	0.271
速效钾含量/(mg · kg^{-1})	0.912	0.101	0.184	0.085
细菌数量/(10^{-7} · g^{-1})	0.860	−0.108	0.049	−0.454
真菌数量/(10^{-4} · g^{-1})	−0.188	−0.771	0.311	0.055
放线菌数量/(10^{-6} · g^{-1})	0.934	−0.114	−0.023	−0.141
纤维分解菌数量/(10^{-5} · g^{-1})	0.403	0.003	−0.443	−0.762
成活率/%	−0.912	0.373	0.092	0.077
新梢长度/cm	0.881	0.409	−0.061	0.156

首先根据因子荷载值计算每个主成分与标准化变量的结果,计算公式如式(2),计算结果见表 6;然后确定权重,根据式(3),4 个主成分的权重依次为 w(0.500,0.212,0.178,0.094);最后构造综合评价函数,将表 6 所得的结果与计算的权重根据公式(4)计算,计算结果见表 7。由表 7 的综合评价结果可知:地膜覆盖的综合效果最好,其次是秸秆,然后是保+地、秸+地、保+秸、对照、保+秸+地、保水剂。

表 6　主成分与标准化变量的关系

处 理	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
CK	−4.858	−6.470	−2.019	−1.169
保水剂	−6.346	0.052	3.869	−1.995
秸 秆	8.872	−3.790	0.288	1.734
地 膜	−7.827	1.214	0.152	1.994
保+秸	9.049	1.379	4.402	−0.095
保+地	−10.060	2.452	−0.578	1.118
秸+地	7.463	1.364	−2.549	−0.034
保+秸+地	3.709	3.798	−3.565	−1.553

表7 综合评价结果

处 理	CK	保水剂	秸 秆	地 膜	保+秸	保+地	秸+地	保+秸+地
综合评价值	−0.109	−0.187	0.162	0.187	−0.009	0.105	−0.003	−0.145
排 序	6	8	2	1	5	3	4	7

3 结论与讨论

经济林是北方山区农民的主要收入来源，在山区和丘陵区，灌溉条件差，土壤瘠薄和干旱缺水是限制经济林优质、丰产的两大自然因素。提高水分利用效率对发展山区经济林产业有着十分重要的意义。本试验对山地新栽核桃幼树采取不同保水措施处理后，表明保水措施可有效地减少土壤水分蒸发和利用自然降雨，提高水分利用效率，这与张义等[16]和揣俊峰等[17]的研究结果基本一致。保水措施在改变土壤含水量的同时，对土壤温度也产生了一定的影响，地膜覆盖大幅度减少了土壤与外界的水分交换，从而降低了潜热交换的损失，同时也减弱了土壤与外界的显热交换，使土壤热通量增大，从而实现增温，这与员学锋等[18]和孙仕军等[19]的研究结果基本一致；秸秆覆盖在土壤表面形成了一道物理阻隔层，能拦截并吸收太阳辐射，阻碍了土壤和大气间的水热交换，从而能使土壤温度保持一个相对稳定的状态，这与 Roger-Estrade J 等[20]的研究结果基本一致。不同土壤保水措施处理后引起土壤水分、温度的变化，从而对土壤养分、土壤微生物产生一定的影响。秸秆覆盖为土壤提供了一个更加温和的环境，更有利于微生物的繁殖，同时秸秆腐烂会增加土壤有机质和氮磷钾的含量。

水热条件是影响作物生长发育最重要的因素，植物的生长发育往往是二者综合作用的结果，本研究也证实了这一点。春季时，秸秆覆盖的土壤水分并不比地膜覆盖的低，但地膜覆盖的新梢生长速率要远快于秸秆覆盖，究其原因在于核桃根系于 10 ℃地温即开始生长，地温 17～19 ℃为根系生长的适温[21-22]，在低温少雨的春季，地膜可增高土壤温度和保持水分，有利于新栽核桃幼树根系活动，使得萌芽提前，有利于根系和新梢的生长，这与赵长增等[23]的研究结果基本一致，秸秆覆盖会降低白天的土壤温度，不利于核桃根系活动，使得萌芽延迟，降低了新栽核桃幼树的成活率。夏季时，地膜覆盖的土壤水分也并不比秸秆覆盖的低多少，但新梢生长速率远慢于后者，其原因在于在一定土壤温度范围内，根系水分传导随土壤温度增加而增加；但超过此范围后，其根系水分传导随温度增加而降低[24]。进入高温多雨的夏季后，地膜覆盖会使白天时的土壤温度过高，会损伤新栽核桃幼树的根系，从而抑制核桃幼树的生长，许树宁等[25]在试验中也得出了相似的结论。而秸秆覆盖可降低白天的土壤温度，使核桃根系免受高温的危害，而且可以有效地利用降雨，从而促进了新梢的快速生长，这在花永辉等[26]的试验中也得到了验证。

如果仅仅以土壤含水量来衡量保水措施保水效果的好坏就失去了实施保水措施的初衷，保水措施的目的是为了在节约水资源的同时不影响树体的正常生长或对树体的生长影响较小，即以最少的用水量获得最大的树体生长量。所以树体的生长指标对于评价保水措施的好坏也是至关重要的。同时保水措施也会对土壤密度、孔隙度、养分含量等状况产生一定的影响，这些指标的改变也会影响土壤含水量和树体的生长，故在评价保水措施优劣时也应考虑这些因素。每种保水措施都有其优缺点，不能简单的以某一项指标衡量保水措施的优劣。基于主成分分析综合评价片麻岩山地新栽幼树保水措施，将土壤理化性质、土壤微生物数量和新栽幼树生长状况 3 个层次的指标纳入该模型，将原始数据标准化，计算综合评价体系的主成分，构建片麻岩山地保水措施的筛选模型，评价保水措施的优劣，筛选出片麻岩山地新栽幼树最佳的土壤保水措施。本试验中得出的结果显示，地膜覆盖处理是片麻岩山地新栽幼树最适宜的保水措施。

[参 考 文 献]

[1] 王媛，盛连喜，李科. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报，2008，19(3)：10-14.

[2] 武敏. 中国水资源现状与利用问题研究[J]. 新乡学院学报，2011，25(3)：25-27.

[3] 杜社妮，耿桂俊，白岗栓，等. 保水剂施用方式对土壤水分及向日葵生长的影响[J]. 水土保持学报，2011，25(4)：139-143.

[4] 侯贤清，李荣，何文涛，等. 保水剂施用量对旱作土壤理化性质及马铃薯生长的影响[J]. 水土保持学报，2015，29(5)：325-330.

[5] 闫永利，魏占民，任秀苹，等. 保水剂对土壤持水性影响及在不同土壤中效果比较[J]. 节水灌溉，2016(1)：34-38.

[6] Moslemi Z，Habibi D，Asgharzadeh A，et al. Effects of super absorbent polymer and plant growth promoting rhizobacteria on yield and yield components of maize under

drought stress and normal conditions[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011,6(19):4471-4476.

[7] 温晓霞,殷瑞敬,高茂盛,等. 不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J]. 西北农业学报,2011,20(11):82-88.

[8] Bunna S, Sinath P, Makara O, et al. Effects of straw mulch on mungbean yield in rice fields with strongly compacted soils[J]. Field Crops Research, 2011, 124(3):295-301.

[9] Moslem J, Jalil A, Pour H and Hamid Z. Mulching impact on plant growth and production of rainfed fig orchards under drought conditions[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012,10(1):428-433.

[10] 梁美英,卜玉山,李伟,等. 不同覆盖材料土壤水温效应与作物增产效应分析[J]. 中国农学通报,2011,27(9):328-335.

[11] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报,2004,23(4):32-36.

[12] 王中堂,彭福田,唐海霞,等. 不同有机物料覆盖对桃园土壤理化性质及桃幼树生长的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(1):142-166.

[13] 张翼夫,王庆杰,胡红,等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(5):138-145.

[14] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[15] 吕海龙,董希斌. 基于主成分分析的小兴安岭低质林不同皆伐改造模式评价[J]. 林业科学,2011,47(12):172-178.

[16] 张义,谢永生. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异[J]. 草业学报,2011,20(2):85-92.

[17] 揣峻峰,谢永生,索改弟,等. 地膜与秸秆双重覆盖对渭北苹果园土壤水分及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):26-30.

[18] 员学锋,汪有科. 不同保墒条件下土壤温度日变化效应研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(3):82-85.

[19] 孙仕军,许志浩,张旭东,等. 地膜覆盖对玉米田间土壤含水率和地温变化的影响[J]. 玉米科学,2015,23(3):91-98.

[20] Roger-Estrade J, Anger C, Bertrand M, et al. Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture [J]. Soil and Tillage Research, 2010,111(1): 33-40.

[21] 陈宝玉,王洪君,滕轶龚,等. 保水剂对土壤温度和水分动态的影响[J]. 中国水土保持科学,2008,6(6):32-36.

[22] 朱小虎,陈虹. 间作条件下核桃根系动态生长研究[J]. 林业科技,2012,37(2):14-16,26.

[23] 赵长增,陆璐,陈佰鸿. 干旱荒漠地区苹果园地膜及秸秆覆盖的农业生态效应研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(1):155-158.

[24] 康绍忠,张建华,梁建生. 土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J]. 植物生态学报,1999,23(3):211-219.

[25] 许树宁,吴建明,黄杏,等. 不同地膜覆盖对土壤温度、水分及甘蔗生长和产量的影响[J]. 南方农业学报,2015,45(9):2073-2076.

[26] 花永辉,白云岗,蔡军社,等. 不同覆盖方式土壤生态效应与成龄葡萄增产效应研究[J]. 北方园艺,2009(8):37-39.

(上接第 254 页)

[4] Rossman L A. Storm water management model user's manual, version5.0[M]. Washington DC: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.

[5] Debo T N, Reese A. Municipal stormwater management [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.

[6] 王超,王沛芳. 城市水生态系统建设与管理[M]. 北京:科学出版社,2004.

[7] 董哲仁,李文奇,孙东亚. 河流生态修复[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[8] 王兴超. 烟台市水生态文明建设思路及建议[J]. 中国水利,2015(17):25-27.

[9] 姜翠玲. 中国生态水利研究进展[J]. 水利水电科技进展,2015(5):168-175.

[10] 王浩. 中国水资源问题与可持续发展战略研究[M]. 北京:中国电力出版,2010.

[11] 张旺,庞靖鹏. 海绵城市建设应作为新时期城市治水的重要内容[J]. 水利发展研究,2014(9):5-7.

[12] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水,2015(3):1-7.

[13] 车伍,武彦杰,杨正,等. 海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J]. 中国给水排水,2015(8):13-17.

[14] 张书函. 基于城市雨洪资源综合利用的"海绵城市"建设[J]. 建设科技,2015(1):26-28.

[15] 张敬. 海绵城市理念在河道治理中的应用构想[J]. 中国水运,2015,15(9):191,220.

[16] 王兴超. 基于海绵城市理论的地下水库工程设计[J]. 长江科学院院报,2017,34(6):1-5.

[17] 刘中培,迟宝明. 大连市地下储水空间雨洪资源利用模式[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1):35-39.