

滨海盐碱地不同造林树种改良土壤效果研究

王合云, 李红丽, 董 智, 陈新闯

(山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室 山东农业大学林学院, 泰山森林生态定位站, 山东 泰安 271018)

摘 要:为探讨滨海盐碱地不同造林树种对土壤改良效果,采用野外取样与室内分析测试相结合的方法,选取不同造林树种林地及对照荒地为研究对象,运用隶属函数法和主成分分析法对土壤肥力特征和盐碱化特征进行综合评价。结果表明:造林可改善土壤结构,降低土壤容重,提高土壤肥力;降低土壤盐渍化程度,由中盐化向轻盐化转化,脱盐过程与碱化过程并存;不同造林地土壤的肥力状况为:刺槐林>冬枣林>杨树林>桑树林>白蜡林>榆树林>紫穗槐林>桤柳林;盐碱化状况为:紫穗槐林>桤柳林>榆树林>杨树林>白蜡林>刺槐林>冬枣林>桑树林。

关键词:造林树种; 土壤肥力; 盐碱化; 滨海盐碱地

中图分类号:S728.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0161-05

Study on the Effects of Different Afforestation Species on the Soil Improvement in Coastal Saline Area

WANG Heyun, LI Hongli, DONG Zhi, CHEN Xinchuang

(College of Forestry, Shandong Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taishan Forest Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: In order to study the soil improvement effects of different afforestation species, soil samples were collected from afforested woodlots different in tree species for lab analysis of fertility and alkalization characteristics, of which a systematic study was done with the method of subordinate function and principal component analysis. Results showed that afforestation could improve soil structure, reduce soil bulk density, improve soil fertility, reduce the degree of soil salinization, which transformed the medium salinization to light salinization, desalination process and alkalization process coexisted; soil fertility in different afforestation models decreased in the order: Black locust>Winter jujube>Poplar>Mulberry>Chinese ash>Elm>Amorpha>Tamarisk; soil alkalization levels decreased in the order: Amorpha>Tamarisk>Elm>Poplar>Chinese ash>Black locust>Winter jujube>Mulberry.

Keywords: afforestation species; soil fertility; salinization; coastal saline soil

土壤盐碱化是世界性的土壤退化问题,不仅造成资源的破坏,而且也给环境和经济发展带来了危害,严重影响现代农业和畜牧业的发展^[1-2]。黄河三角洲是我国三大河口三角洲之一,目前开发程度低,经济开发潜力较大,被誉为“金三角”地带^[3]。潮土和盐土是研究区主要土壤类型^[4]。盐渍化土地面积占整个区域面积的 1/2 以上,呈插花状分布。滨海盐土含盐量高,土壤水分有效性差,已成为该地区造林成活率和保存率最为主要的限制因子^[5]。目前,国内外对盐

碱化严重地区土壤的研究主要集中在土壤盐渍化的发生演化、改良利用、对环境的危害和综合治理等方面^[6-9],而且我国在物理改良、水利工程改良、化学改良等方面已积累了丰富的经验,收到了显著效果^[10],但对自然生境盐胁迫下不同造林树种改良土壤效果的研究较少。为揭示黄河三角洲滨海盐碱地不同造林树种对土壤的改良状况,以沾化县下洼镇枣旺林场盐碱地的 8 种造林地及对照荒地为研究对象,研究了不同造林树种林地的土壤基本理化性质,并对土壤肥

收稿日期:2015-03-21

修回日期:2015-03-27

资助项目:世界银行贷款山东生态造林项目“山东生态造林项目生态效益监测与评估”(SEAP-JC-2);中国水利水电科学研究院专项“泥基本科研 1575:基于含钙废弃物的盐碱土改良技术研究”

第一作者:王合云(1990—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail: xaiqian@163.com

通信作者:李红丽(1972—),女,内蒙古赤峰市人,副教授,硕士生导师,主要从事荒漠化防治与植被恢复研究。E-mail: lhl@sda.u.edu.cn

力性质和盐碱化程度进行了综合评价,以期为进一步研究该区盐碱转移规律及盐碱化土壤的有效改良利用和造林树种的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为山东滨海盐碱地生态造林项目区,位于山东省滨州市沾化县西部的下洼镇枣旺林场,地理坐标为 118°02′70″E, 37°43′92″N。研究区属暖温带半湿润东亚季风区,多年平均气温 12℃,平均降水量 610.3 mm,降水多集中于 6—9 月,年蒸发量为 2 095.1 mm。多年平均日照时间 2 699 h。多年平均大风时间 21 d,多发生于 3—5 月份。研究区地势平坦,地貌类型为黄河冲积平原浅平洼地,海拔 1.6~2.4 m。土壤类型为盐化潮土,平均含盐量在 0.3%

~1.0%之间,pH>7.5,盐分阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 为主。

选取研究区内 8 种造林林地为研究对象,分别为榆树(*Ulmus pumila* L.)、桑树(*Morus alba* Linn. Sp.)、白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb.)、杨树(*Populus* L.)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、冬枣(*Ziziphus jujuba* cv.)和怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.),各树种均于 2009 年春季造林,2013 年调查时苗龄为 6 a。每年进行除草、松土、灌溉等工作。造林前各地块均为盐碱荒地,植被盖度<10%,土壤质地为粉质壤土,土壤容重为 1.51~1.65 g/cm³,有机质质量分数平均为 2.01 g/kg,土壤全氮质量分数 0.62 g/kg,土壤全磷质量分数 0.54 g/kg,土壤全钾质量分数 6.01 g/kg。各树种的生长状况如表 1 所示。

表 1 研究区不同造林树种生长状况

树种	杨树	冬枣	白蜡	紫穗槐	榆树	怪柳	刺槐	桑树
树高/m	7.4	2.2	5.3	2.3	2.8	1.8	6.4	5.9
冠幅/(m×m)	2.6×2.5	2.5×2.3	3.2×2.5	2.3×2.1	1.2×1.4	1.3×1.6	3.0×3.1	3.8×2.9
密度/(株·hm ⁻²)	2000	2200	1666	2000	1666	2000	1666	1666

1.2 土壤采集方法

2013 年 10 月上旬,选取 8 种造林地及距造林地 150 m 外的荒地为研究对象,每种林分设立三个地块,在每个地块内选择有代表性的地段设立 0.1 hm² 的固定标准地,根据造林树种根系生长与分布状况,每个地块内选取 3 个样点,分别取 0—20 cm,20—40 cm 和 40—60 cm 三个土层的土样 500 g,带回室内自然风干后,过 2,1,0.25 和 0.149 mm 的土壤筛,测定土壤理化性质。

1.3 土壤质量指标的测定

土壤容重采用环刀浸水法测定;pH 采用雷磁 pH 计电位计法测定;有机质采用重铬酸钾外加热氧化法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用硫酸—高氯酸熔—钼锑抗比色法测定;全钾采用 NaOH 碱融—火焰光度计法测定;交换性 Na^+ 采用 NH_4OAc — NH_4OH 火焰光度计法测定;阳离子交换量采用乙酸钠—火焰光度计法测定;总碱度为 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的质量分数之和, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 采用双指示剂法测定;碱化度(ESP)为交换性 Na^+ 与阳离子交换量的比值,即 $\text{ESP} = \text{交换性 Na}^+ (\text{cmol/kg}) / \text{阳离子交换量} (\text{cmol/kg}) (\%)^{[11]}$;土壤全盐量采用残渣烘干—质量法测定。

1.4 参数标准化

土壤质量指标之间是不可加和的,但可进行标准化处理来消除各参数之间量纲的差别。本文采用模

糊数学中隶属函数分析法,累加各造林树种林地理化指标的隶属值,求取平均值,根据各树种平均值大小来确定土壤改良效果^[12]。计算方程为:

(1) 如果所测指标与土壤改良效果呈正相关,则:

$$X_{(u)} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

(2) 如果所测指标与土壤改良效果呈负相关,则:

$$X_{(u)} = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: $X_{(u)}$ ——各树种某一指标的隶属函数值; X ——各树种某一指标的测定值; X_{\max} ——所有树种此指标的最大值; X_{\min} ——所有树种此指标的最小值。

1.5 数据处理与分析

全部数据处理借助软件 Excel 2007 和 SPSS 17.0。运用隶属函数法和主成分分析法进行土壤肥力特征和盐碱化特征评价,以揭示不同造林树种对土壤改良状况。

2 结果与分析

2.1 不同树种造林地土壤理化性质特征分析

由表 2 可知,不同树种均对盐碱土有一定改良作用,可改善土壤结构,降低土壤容重,提高土壤肥力,但因树种的生物生态学特性不同,改土增肥能力也有所不同。人工造林林地土壤容重平均为 1.36 g/cm³,比对照荒地降低 10%。不同造林地及荒地土壤 pH 均在

7.9 以上,呈碱性。造林地土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均值分别为 6.49,1.14,1.20,7.17 g/kg,比对照荒地分别提高了 206%,80%,224%,19%。林木从土壤下层吸收养分,通过凋落物途径归还土壤,枯落物及其分解增加了土壤的有机物质和养分含量。

不同造林树种对阳离子交换量的影响不同,其中紫穗槐、怪柳、榆树和杨树林地土壤阳离子交换量高于荒地;各树种林地的总碱度均高于荒地,紫穗槐林地土壤的平均总碱度最高,为 1.17 cmol/kg,其次是怪柳林地,为 0.99 cmol/kg,荒地最低,为 0.48 cmol/kg。土壤碱化度在不同造林树种林地的差异较大,其中紫穗槐林地的平均碱化度最大,为 10.55%,其次是怪柳林地,为 8.90%,而荒地为 5.95%。荒地土壤全盐量最高,平均为 3.89 g/kg,为中度盐渍土,除冬枣林地土壤(2.09 g/kg)外,各林地土壤全盐量平均值均小于 2.00 g/kg,为轻度盐渍化土,其中怪柳林地土壤全盐量最低,平均值为 1.31 g/kg,各造林树种林地平均含盐量降低 46%~66%,不同树种对土壤含盐量改良效果表现为:怪柳林>白蜡林>杨树林>桑树林>刺槐林>紫穗槐林>榆树林>冬枣林。

交换性 Na⁺与碱化度在各林地土壤中的变化趋势一致,紫穗槐林地土壤的平均交换性 Na⁺质量摩尔浓度最高,为 1.93 cmol/kg,其次是怪柳林地,为 1.57 cmol/kg,桑树最低,为 0.33 cmol/kg,桑树土壤交换性 Na⁺与碱化度明显低于荒地,可能与种植试验前土壤存在不一致有关。

含有较多交换性 Na⁺的土壤胶体在土壤有较多可溶盐的条件下,由于土壤溶液的浓度较大阻止了交换性 Na⁺的水解,所以,土壤不发生碱化。只有当土壤脱盐到一定程度,土壤交换性 Na⁺发生水解,土壤才呈现碱化特征。通常碱化过程与脱盐过程相伴发生。黄河三角洲滨海盐碱地地区,年降水量主要集中于 6—8 月份内,每降一次有效降雨,就淋洗一次土壤盐分,天晴后地表又因蒸发而重新积盐。在这样盐分反复地淋洗、积累的过程中,土壤较容易发生碱化。当土壤中脱盐和积盐过程频繁交替发生时,可溶性 Na⁺进入土壤胶体取代 Mg²⁺、Ca²⁺,土壤即发生碱化^[13]。经过各林分改造作用,土壤盐渍化程度降低,由中盐化向轻盐化转化,脱盐过程与碱化过程同时发生,各林地土壤全盐量均低于荒地,而 pH(桑树)高于荒地。

表 2 不同造林树种林地土壤理化性质

树种	杨树	冬枣	白蜡	紫穗槐	榆树	怪柳	刺槐	桑树	荒地
土层/cm	0—60	0—60	0—60	0—60	0—60	0—60	0—60	0—60	0—60
容重/(g·cm ⁻³)	1.33±0.12	1.33±0.17	1.36±0.03	1.39±0.14	1.41±0.08	1.45±0.11	1.22±0.05	1.37±0.02	1.52±0.09
pH	8.49±0.21	8.28±0.16	8.28±0.36	8.61±0.36	8.56±0.26	8.65±0.24	8.29±0.20	7.99±0.06	8.03±0.09
有机质/(g·kg ⁻¹)	5.48±0.11	5.51±0.05	5.34±0.16	7.75±0.18	5.89±0.20	5.32±0.15	9.93±0.06	6.67±0.02	2.12±0.06
全氮/(g·kg ⁻¹)	1.16±0.24	1.20±0.28	1.15±0.02	1.16±0.07	0.87±0.24	0.84±0.13	1.51±0.21	1.27±0.09	0.64±0.14
全磷/(g·kg ⁻¹)	1.28±0.16	1.38±0.05	1.43±0.22	1.00±0.08	1.07±0.07	0.95±0.09	1.25±0.11	1.24±0.27	0.54±0.37
全钾/(g·kg ⁻¹)	7.62±0.07	7.38±0.11	6.64±0.18	6.65±0.17	7.91±0.07	6.58±0.12	7.69±0.22	6.89±0.14	6.02±0.16
CEC/(cmol·kg ⁻¹)	16.51±0.38	15.11±0.31	15.06±0.56	17.91±0.12	17.46±0.13	17.66±0.36	15.12±0.51	10.67±0.32	15.9±0.26
总碱度/(cmol·kg ⁻¹)	0.74±0.12	0.55±0.15	0.83±0.08	1.17±0.21	0.86±0.15	0.99±0.17	0.74±0.05	0.68±0.03	0.48±0.05
碱化度 ESP/%	6.91±0.13	5.19±0.25	5.59±0.31	10.55±0.33	8.73±0.17	8.90±0.38	5.22±0.06	3.05±0.35	5.95±0.29
全盐量/(g·kg ⁻¹)	1.73±0.19	2.09±0.40	1.71±0.16	1.84±0.22	1.99±0.19	1.31±0.15	1.80±0.21	1.78±0.18	3.89±0.22
交换性 Na ⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	1.15±0.24	0.78±0.05	0.87±0.36	1.93±0.47	1.54±0.36	1.57±0.18	0.79±0.10	0.33±0.07	0.95±0.06

2.2 不同树种造林地土壤肥力特征评价

土壤质量的核心是土壤生产力,其基础是土壤肥力^[14]。土壤肥力质量是土壤质量的重要组成部分,是土地生产力的基础,直接关系到生产的可持续性。在生产应用上,有机质和养分含量的大小常用来衡量土壤肥力的高低^[15]。根据盐碱土壤特点,选取以下对植物生长发育影响较大的七个指标:土壤容重、pH、有机质、全氮、全磷、全钾及阳离子交换量,构成评价的因子。应用隶属函数分析法对 8 种不同树种造林地土壤肥力进行综合评价,从表 3 可以看出,8 种不同造林树种对土壤肥力的改良状况影响不一,刺

槐林地土壤肥力的综合指标值最大,为 0.803;冬枣林地土壤次之,为 0.539;怪柳林地土壤最小,为 0.138。其肥力指标综合排序为:刺槐林>冬枣林>杨树林>桑树林>白蜡林>榆树林>紫穗槐林>怪柳林。刺槐对土壤肥力的改良效果最好,这是因为刺槐林地土壤表层枯落物层较厚,经微生物分解后产生较多的腐殖质,增加了有机物的积累。怪柳对土壤肥力的改良效果最差,这是因为怪柳林地枯落物积累少,有机物积累也少,土壤肥力较低。

2.3 不同树种造林地土壤盐碱化特征评价

不同造林地土壤盐碱化程度的定量评价对于该

区土壤的有效改良利用具有重要意义。考虑到土壤盐碱化程度影响因素较多、相互之间密切相关的特点,根据所取土样各项理化指标的分析结果,取 pH 值、碱化度、总碱度、交换性 Na^+ 、全盐量 5 个指标对研究区土壤的盐碱化程度进行综合评价。运用主成

分分析法^[16],以各主成分特征的贡献率为权重,加权计算^[17]各林地土壤盐碱化综合指标值。盐碱化综合指标值越大,说明土壤盐碱化程度越高,对植物的危害性越大。通过对 5 个指标的主成分分析,得出主成分的特征值、贡献率及其特征向量,如表 4 所示。

表 3 不同造林树种林地土壤肥力指标综合评价指数及顺序

指标	杨树	冬枣	白蜡	紫穗槐	榆树	怪柳	刺槐	桑树
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.522	0.522	0.391	0.261	0.174	0.000	1.000	0.348
pH	0.242	0.561	0.561	0.061	0.136	0.000	0.545	1.000
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.035	0.041	0.004	0.527	0.124	0.000	1.000	0.293
全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.478	0.537	0.463	0.478	0.045	0.000	1.000	0.642
全磷/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.688	0.896	1.000	0.104	0.250	0.000	0.625	0.604
全钾/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.782	0.602	0.045	0.053	1.000	0.000	0.835	0.233
CEC/($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.807	0.613	0.606	1.000	0.938	0.965	0.615	0.000
综合评价	0.508	0.539	0.439	0.355	0.381	0.138	0.803	0.446
顺序	3	2	5	7	6	8	1	4

由表 4 可知,前两个主成分 Y_1 和 Y_2 的方差和占全部方差的比例为 95.736%,即基本上保留了原来指标的信息。选取 Y_1 为第一主成分, Y_2 为第二主成分对上述 5 个指标的主成分分析,得到两个主成分方程为:

第一主成分方程: $Y_1 = 0.495x_1 + 0.471x_2 + 0.481x_3 - 0.265x_4 + 0.481x_5$

第二主成分方程: $Y_2 = -0.051x_1 - 0.201x_2 + 0.354x_3 + 0.839x_4 + 0.357x_5$

式中: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ——pH 值、总碱度、碱化度、全盐量、交换性 Na^+ 。从主成分特征向量可以看出,第一主成分 Y_1 可以看成是 x_1, x_2, x_3, x_5 的综合变量。第二主成分依赖于变量 x_4 ,这标示着 Y_2 反映的是全盐量的水平。

表 4 不同造林树种林地土壤主成分特征值及其贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.749	74.975	74.975
2	1.038	20.761	95.736
3	0.210	4.196	99.932
4	0.003	0.060	99.992
5	0.001	0.008	100.000

由表 4 可知,所选前 2 项主成分的特征值分别是 3.749,1.038,权重分别为 0.783,0.217。将前 2 项主成分的特征向量分别乘以相对应的每一样点原始数据,得到每一样点的标准化原始数据矩阵,即得到每一样点前 2 项主分量值,并将每一样点前 2 项主成分值再乘以相应的权重,进行加权求和,得到每一样点的得分值,再对每一造林树种土壤的得分求其平均值,得到不同造林树种土壤盐碱化综合指标值。

由图 1 可知,不同造林树种对土壤盐碱化程度影响不一,紫穗槐林地土壤的盐碱化综合指标值最大,

为 9.239;怪柳林地土壤次之,为 8.299;刺槐林地、冬枣林地和桑树林地土壤的盐碱化综合指标值低于荒地。不同造林地土壤的得分排序为:紫穗槐>怪柳>榆树>杨树>白蜡>刺槐>冬枣>桑树。

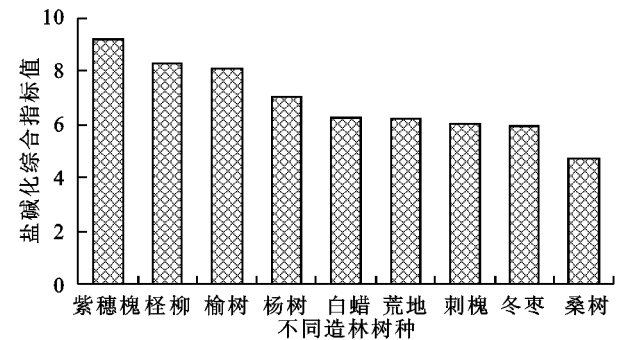


图 1 不同造林树种土壤盐碱化综合指标值

所以,根据盐碱化综合指标值得出的 8 种造林树种林地的盐碱化状况为:紫穗槐林>怪柳林>榆树林>杨树林>白蜡林>刺槐林>冬枣林>桑树林。紫穗槐林地和怪柳林地盐碱化综合指标值较高,可能与土壤中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和交换性 Na^+ 的含量有关, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 具有较大的碱化土壤的能力,在其含量很低的情况下(0.5 cmol/L)就可以使土壤发生碱化,土壤中苏打的存在引起 pH 值显著升高,将土壤溶液中大部分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 代换出来,使土壤具有很高的碱化度,交换性 Na^+ 的水解为强碱性反应, H^+ 取代 Na^+ 而失去活性,产生的 OH^- 使土壤的 pH 值升高,最终导致土壤碱化程度较高。

3 结论

(1) 不同造林树种均对盐碱土有一定改良作用,可改善土壤结构,降低土壤容重,提高土壤肥力,但因

树种的生物生态学特性不同,改土保肥能力也有所不同。经过各林地改造作用,土壤盐渍化程度降低,由中盐化向轻盐化转化,而土壤碱化程度有所增加,土壤脱盐过程与碱化过程并存,各林地土壤全盐量均低于荒地,而 pH(桑树)高于荒地。交换性 Na^+ 与碱化度在各林地土壤中的变化趋势一致。土壤碱化程度以紫穗槐林地最大,怪柳林地次之。

(2) 以隶属函数分析法对各造林地土壤肥力特征的综合评价结果为:刺槐林>冬枣林>杨树林>桑树林>白蜡林>榆树林>紫穗槐林>怪柳林,刺槐对土壤肥力的改良效果最好。

(3) 以主成分分析法对各造林地土壤盐碱化程度的综合评价结果为:紫穗槐林>怪柳林>榆树林>杨树林>白蜡林>刺槐林>冬枣林>桑树林,其中紫穗槐林地的土壤盐碱化程度最高,刺槐林地、冬枣林地和桑树林地土壤盐碱化程度低于荒地。

参考文献:

- [1] 张杰,陈立新,乔璐,等. 大庆市不同土壤类型盐碱化特征及评价[J]. 东北林业大学学报,2010,38(7):119-122.
- [2] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究,2005,12(6):28-30.
- [3] 丁晨曦,李永强,董智,等. 不同土地利用方式对黄河三角洲盐碱地土壤理化性质的影响[J]. 中国水土保持科学,2013,11(2):84-89.
- [4] 王玉祥,夏阳,盖广玲,等. 植树造林在黄河三角洲生态与环境建设中的作用[J]. 水土保持研究,2005,12(5):256-258.
- [5] 王丽琴,李红丽,董智,等. 黄河三角洲盐碱地造林对土

壤水分特性的影响[J]. 中国水土保持科学,2014,12(1):38-45.

- [6] 黄建成,陈国栋,李鹏. 宁夏引黄灌区土壤盐渍化现状与改良[J]. 水土保持研究,2008,15(6):256-258.
- [7] 张巍,冯玉杰. 松嫩平原盐碱土理化性质与生态恢复[J]. 土壤学报,2009,46(1):169-172.
- [8] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, et al. Amelioration strategies for sodic soils: a review[J]. Land Degradation & Development, 2001,12(4):357-386.
- [9] Jordan M M, Navarro-Pedreno J, Garcia-Sanchez E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications [J]. Environmental Geology, 2004,45(4):448-456.
- [10] 宇振荣. 中国土地盐碱化及其防治对策研究[J]. 农业生态环境,1997,13(3):1-5.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [12] 李常艳. 滨海盐碱地植物耐盐性的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [13] 阎鹏,徐世良. 山东土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1994.
- [14] 张桃林,王兴祥. 土壤退化研究的进展与趋向[J]. 自然资源学报,2000,15(3):280-283.
- [15] 罗珠珠. 不同耕作措施下黄土高原旱地土壤质量综合评价[D]. 兰州:甘肃农业大学,2008.
- [16] 林学斌,陈湘,刘明德. SPSS 11 统计分析实务设计宝典[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
- [17] 陈立新,肖洋. 大兴安岭林区落叶松林地不同发育阶段土壤肥力演变与评价[J]. 中国水土保持科学,2006,4(5):50-55.

(上接第 160 页)

- [5] 曹建廷,秦大河,罗勇,等. 长江源区 1956—2000 年径流量变化分析[J]. 水科学进展,2007,18(1):29-33.
- [6] 赵军凯,李九发,戴志军,等. 长江宜昌站径流变化过程分析[J]. 资源科学,2012,34(12):2306-2315.
- [7] 丁永建,叶柏生,韩添丁,等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异[J]. 中国科学地球科学:中文版,2007,37(2):206-214.
- [8] 覃红燕,谢永宏,邹冬生. 湖南四水入洞庭湖水沙演变及成因分析[J]. 地理科学,2012,32(5):509-615.

- [9] Stanford J A, Wang J V, Liss W J, et al. A General protocol for restoration of regulated rivers[J]. Regulated rivers: Research & Management, 1996(12):391-413.
- [10] Allan J D, Bain M B, Pestegaard K L, et al. The natural flow regime: A paradigm for river conservation [J]. Bioscience, 1997,47(11):769-784.
- [11] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文,2010,30(4):47-51.