

河西走廊敦煌绿洲天然胡杨林土壤水分 空间变化特征研究

张克新¹, 刘普幸¹, 霍华丽¹, 吴三雄²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区管理局, 甘肃 敦煌 736200)

摘要: 利用经典统计学与地统计学相结合的方法对甘肃敦煌绿洲天然胡杨林土壤含水量的空间变化规律性进行研究。结果表明: 敦煌绿洲天然胡杨林土壤含水量变化趋势总体表现为随深度增加而不断增加的趋势。0–60 cm 土壤含水量变化程度较大, 再向下各层土壤含水量变化趋于平缓。土壤水分变异系数在不同土壤层有较明显的差异, 土层越深, 其含水量变化程度越小, 这主要与气候、土壤质地及树龄等因素有关。采用 GIS 的反距离加权 (Inverse Distance Weighted) 插值法分析表明, 研究区土壤含水量存在明显的空间差异和较强的相似性。即各层均表现为自西向东逐渐增加的空间格局, 这与西临库姆塔格沙漠和罗布泊东靠绿洲的地貌格局相一致。

关键词: 敦煌绿洲; 胡杨林; 土壤含水量; 反距离加权插值; 空间变化

中图分类号: S715.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0109-05

The Spatial Variations of Soil Water Content under the *Populus euphratica* in Dunhuang Oasis in Hexi Corridor

ZHANG Ke-xin¹, LIU Pu-xing¹, HUO Hua-li¹, WU San-xiong²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Administrative Bureau of the West Lake National Nature Reserve in Dunhuang of Gansu, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: The spatial variability of soil water content is remarkable. Here we used traditional statistics and semivariance analysis of geostatistics to study the spatial variability of the soil water content under the natural *populus euphratica* forests in the west lake nature reserve of Dunhuang oasis. The results showed that there are about 15–20 cm dry sand layers in most parts of land. That makes the surface soil water content at the lowest level, between 0.8%~4.49%. The soil water content is raised from upper to lower, but not very obvious at different layers. The soil water content changed sharply in 0–60 cm and changed moderately in 60–120 cm. The variation efficient of the soil water content is obviously different in different soil and becomes smaller with the depth increasing. The change is mainly relative to climate, soil texture and tree-age and so on. Using the GIS (Inverse Distance Weighted, IDW) interpolation method analysis, the soil water content of study area exist obvious space differences and strong comparability. Each layer is gradually increased spatial pattern from west to east. It was consisted with the topographical features of the west of the Kumtag desert and the Lop Nor region and the east of Dunhuang oasis.

Key words: Dunhuang Oasis; *populus euphratica*; soil water content; IDW interpolation; spatial variability.

土壤水分是气候、植被、地形及土壤因素等自然条件的综合反映, 是干旱、半干旱地区生态系统和植被建设的基础^[1]。干旱区植被是绿洲外围不可缺少

的生态屏障, 对荒漠生态系统的脆弱程度具有指示作用, 能不同程度表征绿洲的退化与稳定性状况, 在抑制荒漠化过程和保护生物多样性等方面具有重要的

收稿日期: 2010-04-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(40961035); 甘肃省自然科学基金项目(0803RJZA094); 甘肃省教育厅导师项目(0801-11); 甘肃省级重点学科自然地理学

作者简介: 张克新(1980–), 男, 甘肃民勤人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区域环境与绿洲建设。E-mail: xbsdzkx@gmail.com

通信作者: 刘普幸(1964–), 女, 山西平遥人, 教授, 博士, 研究方向为干旱区域环境与绿洲建设、树轮水文学。E-mail: fmlpx@nwnu.edu.cn

意义。我国西北干旱区荒漠植被覆盖率低,生态系统十分脆弱,由于自然和人为因素的影响,近年来水资源短缺、土地荒漠化、土壤次生盐渍化、天然植被严重退化,沙尘暴频发等生态环境问题日益突出。作为荒漠区植被地下生境的关键因子,土壤水分的研究受到许多学者的重视与关注^[2-6]。王军等^[2]利用地统计学方法研究了黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分的空间结构特征及其季节变化规律,结果表明土壤水分具有较高的分维数,表现出强烈和中等程度的空间自相关。邱扬等^[3]对土壤水分时空变异及其与环境因子的关系进行研究发现土壤水分时空变异是由多重尺度上的土地利用(植被)、气象(降雨)、地形、土壤、人为活动等多因子综合作用的结果。冉有华等^[4]分析了黑河流域盐碱化草地网格尺度多层土壤水分空间分布的时间变化特性,为土壤水分监测点设置及点观测数据的时空尺度转换提供先验知识。常学向等^[5]研究了黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况,发现绿洲区土壤湿度随植物盖度的增加而减少。马海艳等^[6]对额济纳不同植被土壤水分的时空变化特征进行了分析,结果表明土壤垂直剖面含水量自下而上并不是严格递减的,其中戈壁及人工梭梭林地土壤水分在垂直剖面上分布较均匀;胡杨林地和苜蓿地各剖面土壤水分差异较大。然而,敦煌绿洲天然胡杨林生长的土壤水分究竟有何特性?其空间变化规律如何至今尚未见报道。敦煌西湖国家级自然保护区是河西走廊绿洲的第一道天然植被阻沙屏障,其胡杨林是河西绿洲胡杨林的重要组成部分和主要分布区,对于维护该区域生态平衡有十分重要的作用。因此,本文通过对甘肃敦煌西湖国家级自然保护区胡杨林下土壤样品的采集、室内分析,借助 GIS 手段,探讨研究区内胡杨林生长区土壤水分空间变化特征,以期对该区域生态环境的保护与重建提供科学依据。

1 研究区概况

敦煌绿洲位于甘肃省河西走廊最西端,地处甘、青、新三省(区)交汇地带,东邻瓜州县,西、北部接新疆维吾尔自治区,南连肃北蒙古族自治县和阿克塞哈萨克族自治县。地理位置为 $92^{\circ}15' - 95^{\circ}30' E$, $39^{\circ}40' - 41^{\circ}35' N$, 东西长 60~240 km, 南北宽 90~230 km, 总面积 3.1 万 km^2 , 其中绿洲面积 1 400 km^2 , 仅占敦煌绿洲土地总面积的 4.5%。敦煌绿洲平均海拔 1 138 m, 地势总体是南部高、北部低, 地貌大体可分为南部山地、北部(北山)丘陵和走廊平原三大类。敦煌绿洲属典型的暖温带干旱气候, 降雨稀少, 年均降雨量仅有 38.1 mm, 年均蒸发量为 2 486 mm。昼

夜温差大, 多年平均气温为 $9.6^{\circ}C$, 多年平均日照时数 3 246.7 h, 多年平均无霜期达 165 d, $\geq 10^{\circ}C$ 积温 3 600~4 200 $^{\circ}C$, 光热资源十分丰富。天然植被主要有怪柳、白刺、沙拐枣、骆驼刺、梭梭、胡杨、沙枣、芦苇、胀果甘草、罗布麻、厚穗冰草、芨芨草、艾蒿、沙蒿、沙米、胖姑娘等。主要土壤类型为灌淤土、潮土、风沙土、棕漠土、盐土、草甸土、沼泽土等。

甘肃敦煌西湖国家级自然保护区位于敦煌市西部, 西邻库姆塔格沙漠和罗布泊, 南接阿克塞县, 北连新疆哈密市。地理坐标为: $92^{\circ}45' - 93^{\circ}50' E$, $39^{\circ}45' - 40^{\circ}36' N$ 。总面积 66 万 hm^2 , 其中核心区面积 19.8 万 hm^2 , 缓冲区面积 14.6 万 hm^2 , 实验区面积 31.6 万 hm^2 。保护区湿地面积 9.8 万 hm^2 , 其中芦苇沼泽 3.4 万 hm^2 , 胡杨林主要分布在后坑、火烧湖、大马迷兔、小马迷兔、湾腰墩和疏勒河河床。但采样时观察到区内胡杨林的树高均比参照标准低^[8], 且出现了主干下部的小枝枯死, 部分树木顶部枯梢、空心或朽心等现象。显然, 目前保护区胡杨林生境正在不断恶化, 胡杨已表现出衰退迹象。

2 材料与方法

2.1 样本的采集

本研究经过实地考察与调研, 于 2007 年 5 月中旬和 2009 年 9 月中旬分别在甘肃敦煌西湖国家级自然保护区胡杨林内选择天然胡杨林生长较为密集、面积较大且很少受人为活动的胡杨林区, 选取 7 个采样点(表 1), 分别是后坑(HK)、大马迷兔(DMMT)、疏勒河河床(SLH)、湾腰墩(WYD)和火烧湖(HSH₁, HSH₂, HSH₃)等。研究区各个采样点的下垫面特征基本相似, 地表都有厚度约为 15~20 cm 的碱土层或沙土, 并伴有芦苇、怪柳、胀果甘草、骆驼刺等耐盐碱植物。在每个采样点内, 按照土壤地理学的野外布点方法, 结合实地情况, 在每个采样点选择不同发育阶段胡杨树下, 避开根部密集根系 1 m 的范围, 采样点间隔为树与树之间的间距, 大约 10~15 m, 考虑到研究的代表性和土壤地理学的采样要求, 在每个采样点内共设置 15 个小采样点, 用 GPS 定位并详细记录采样点下垫面的情况。参考一般盐渍化土壤研究的采样深度为 1 m 左右的标准^[7], 确定土壤样品的采集深度定为 1.2 m。在每个小采样点内取 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100, 100~120 cm 不同深度的土样, 用铝盒和塑料密封袋封存, 及时带回实验室测定土壤水分含量。

2.2 研究方法

2.2.1 室内预处理 在实验室, 采用烘干法测定土

壤含水量。土壤含水量计算采用重量百分数, 计算公式为

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\%$$

式中: W ——土壤水分含量(%) ; W_1 ——土样湿重(g) ; W_2 ——土样干重(g)。

表 1 采样点胡杨基本概况

| 采样点 代码 | 经度 | 纬度 | 海拔/ m | 胸径 范围/ cm | 目测 高度/ m |
|------------------|----------|----------|----------|--------------|-------------|
| HK | 93.71° E | 40.35° N | 991 | 21.2~ 35.5 | 5~ 8 |
| DMMT | 93.43° E | 40.28° N | 916 | 21~ 28.1 | 4~ 7 |
| SLH | 93.44° E | 40.34° N | 934 | 16.2~ 30.9 | 3~ 6 |
| WYD | 93.24° E | 40.14° N | 894 | 22.3~ 31.5 | 4~ 8 |
| HSH ₁ | 93.71° E | 40.34° N | 1023 | 6.4~ 9.6 | 3~ 4 |
| HSH ₂ | 93.74° E | 40.31° N | 1010 | 11.1~ 12.4 | 5~ 7 |
| HSH ₃ | 93.78° E | 40.29° N | 993 | 14.3~ 18.6 | 6~ 8 |

2.2.2 经典统计学和 GIS 的空间插值方法 本文通过计算不同采样点 0~ 120 cm 不同土壤层次的变异系数 C_v 值的大小来反映土壤含水量在垂直空间上的动态特征^[9-11]。用不同土壤层次的含水量作为参数, 利用 ArcGis 反距离加权 (Inverse Distance WeiGhted) 插值法绘制土壤含水量的空间分布图, 分析研究区土壤含水量在垂直方向和不同采样点间的空间差异。

3 结果与分析

3.1 土壤含水量的垂直分布特征

土壤水分是干旱、半干旱地区生态系统和植被建设的基础, 而荒漠绿洲内依靠天然降水和地下水维持的天然植被稳定性与土壤含水量密切相关^[6]。从研究区 7 个采样点土壤含水量随深度的变化(图 1)可以看出, 研究区土壤含水量在垂直空间上表现出一定的动态特征和规律性。土壤含水量的变化趋势总体表现为随深度的增加而增加, 并且不同生境不同树龄的表层土壤含水量最低, 变化程度较大。7 个采样点表层土壤含水量介于 0.8%~ 4.49%。其中, 土壤含水量最小的采样点为 DMMT 仅为 0.8%, 最大为 HK 为 4.49%, 相差 3.69%。这主要由于受大风、强蒸发等以及不同树龄胡杨叶面蒸腾和地形质地的影响, 导致表层土壤含水量最小且变化程度最大。从表层到 60 cm 之间土壤水分含量显著增加, 平均增加 2.87%。60 cm 以下各层土壤水分含量变化趋于平缓, 增幅较小。在 60~ 120 cm, 除疏勒河床 SLH 与 DMMT 两个采样点土壤含水量有较明显的减少(从 60~ 120 cm 分别由 8.44%、4.0% 减少到 6.13% 和 3.2%) 外, 其余各点均略有增加。特别是疏勒河河床

SLH 的土壤含水量自 60 cm 的 8.53% 减少到 80 cm 的 8.44% 到 100 cm 的 6.48%, 直至 120 cm 的 6.13%, 是自 60 cm 以下减少幅度最大的区域。这是由于 1960 年后瓜州县建成双塔水库, 上游过量用水, 减少了对下游地区地下水的补给, 使向西注入罗布泊的疏勒河下游河道干涸^[12]。大马迷兔因位于敦煌盆地的中央部位及疏勒河冲积平原尾端, 其地形为碟形洼地和梁状缓丘, 以及戈壁流沙的影响, 再加上干旱、大气干燥、多大风、日照蒸发强烈等导致其土壤含水量较少。在 100~ 120 cm, 除 HSH₂ 土壤含水量增加外, 其余各采样点的土壤含水量的变化趋势都呈降低趋势。这可能与 HSH₂ 采样点位于保护区最东部的火烧湖, 离绿洲和党河等地表水最近, 地下水水位较高有关, 这是引起其土壤含水量在 20 cm 土层以下显著增加的重要原因。7 个采样点除 HK 和 HSH₂ 两个点自 60 cm 以下土壤含水量超过了 11%, 100~ 120 cm 高达 18%, 其余 5 个点均小于 9%。这与 HK 和 HSH₂ 两个采样点靠近东面敦煌绿洲(耕作区), 地下水位较浅的事实相符外, 也说明研究区因地势南北高, 中间低, 自西南向东北倾斜的地质地貌特征相符合。敦煌境内最大主要河流和地表水资源—党河位于敦煌绿洲东部, 而近年来水量不但减少, 离保护区较远, 绝大多数采样点远离水源补给区, 致使地下水位埋深较深。

上述分析与已有研究^[12-14]表明: 胡杨的水平根系或须根系主要分布在地表土层 30~ 80 cm 的范围内, 加之各样地胡杨林的树龄不同, 而不同林龄胡杨林的根系发达程度也不同, 吸收地下水的能力也就各不相同。不同树龄的胡杨林土壤含水量不同, 表现为小树的土壤含水量高于大树^[14]。此外, 疏勒河上游修建水库后, 使下游来水量减少, 河道断流, 地下水补给系统失衡, 造成两岸胡杨、红柳林成片枯死^[13]。显然, 保证现有疏勒河在瓜州盆地有一定数量的下泄量, 并合理开发利用敦煌—瓜州绿洲水资源、保护和维持研究区水资源的现有量, 节约水资源, 是改善该区域天然胡杨林生存环境, 保护和恢复河西走廊最大胡杨林分布区胡杨健康发展的关键。

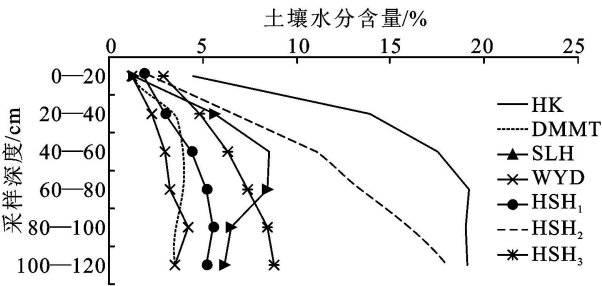


图 1 不同样地的土壤水分含量

在干旱半干旱气候条件下,自然状况的林地水分其垂直变化除受土壤质地、地下水埋深、植被类型等影响外,还受降水、风等气象要素的影响。土壤水分在各层土壤中的分布,随各层土壤性质、作物根系分布的多少和气象因素而变化,不同样地土壤水分的垂直分布在同一层次变化不同。土壤含水量在垂直空间上表现为一定的动态特征,可用样本变异系数 C_v 的大小来反映此特征。按一般对变异系数的评估,当 $C_v \leq 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\% < C_v \leq 100\%$ 时为中等变异,当 C_v 大于 1 是为强变异性^[11]。

通过计算可以得出该研究区不同样地土壤含水量的变异系数(表 2)。从表 2 中可以看出,各采样点土壤水分含量的变异系数在不同土壤层次间有较

明显的差异。土壤水分的垂直变化规律主要受向上的蒸发和向下的入渗再分布两个过程所支配。HK 和 HSH₃ 表层土壤水分的变异系数较大,为 96% 和 95%,属于中等变异性,说明这一土层含水量变化剧烈程度相似而且最大;土层越深,其含水量变化程度越小。DMMT, HSH₁, HSH₂ 和 SLH 的表层土壤水分的变异系数较小,在 44%~90% 之间,属于中等变异性;而在 20~40 cm 土壤水分的变异系数最大,在 75%~129% 之间,属于中强度变异;40 cm 之后由于深层土壤含有黏粒,结构紧密,可以使土壤有较好的持水性,所以土壤水分变异系数趋于平缓。WYD 各层土壤含水量的变异系数都较大,属于中强度变异。

表 2 不同样地土壤水分含量的变异系数

| 深度/cm | HK | DMMT | SLH | WYD | HSH ₁ | HSH ₂ | HSH ₃ |
|---------|------|------|------|------|------------------|------------------|------------------|
| 0-20 | 0.96 | 0.44 | 0.45 | 1.23 | 0.90 | 0.57 | 0.95 |
| 20-40 | 0.37 | 0.97 | 0.75 | 1.01 | 0.96 | 1.29 | 0.64 |
| 40-60 | 0.16 | 0.83 | 0.66 | 0.90 | 0.55 | 0.51 | 0.65 |
| 60-80 | 0.23 | 0.77 | 0.59 | 1.00 | 0.41 | 0.33 | 0.66 |
| 80-100 | 0.23 | 0.67 | 0.68 | 1.06 | 0.47 | 0.16 | 0.51 |
| 100-120 | 0.23 | 0.54 | 0.55 | 0.55 | 0.56 | 0.26 | 0.59 |

3.2 土壤含水量的空间分布特征

利用地统计学方法中的反距离加权(Inverse Distance Weighted)插值法,将 7 个采样点不同土壤层的含水量作为参数,绘制土壤含水量的空间分布(图 2)。从图 2 中可以看出,研究区各土层含水量的分布在空间上存在着较强的相似性,各土层含水量的空间分布均呈条带状或斑块状格局。土壤含水量总体上均表现出了西南低、东北高的空间分异规律。表层 0~20 cm 土壤含水量呈由西向东增加的趋势;20~40, 40~60,

60~80 cm 这三层土壤含水量变化趋势相似,均呈由西向东增加,但是中间的疏勒河河床和大马迷兔由于地下水位较低^[13],沙化严重,使其土壤水分含量减少;但 80~120 cm 土壤含水量也是呈由西向东增加,但是由 80~120 cm 土壤含水量的空间变化近乎一致,这说明水分随深度的增加空间变化趋势越来越小。这种变化规律主要是由于疏勒河上游用水增加引起导致地下水位下降^[13]、并与研究区西临库姆塔格沙漠和罗布泊,东靠绿洲的地貌分布格局相一致。

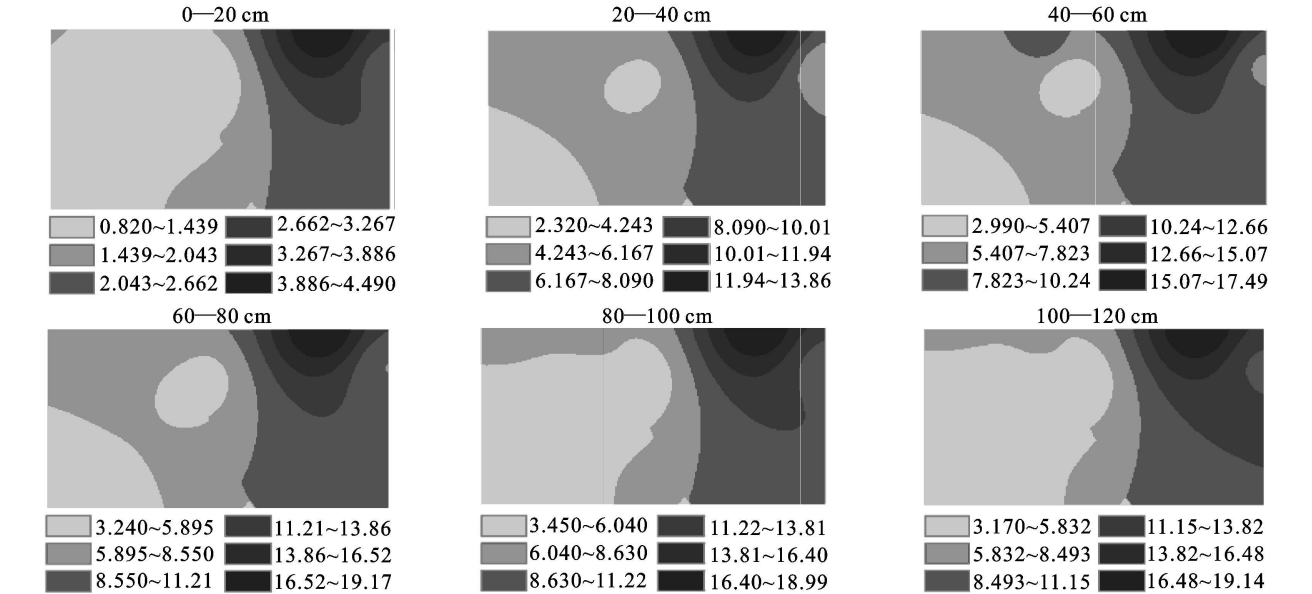


图 2 不同深度土壤含水量(%) 的空间插值拟合分布图

4 结论

(1) 河西走廊敦煌绿洲天然胡杨林土壤含水量变化总体表现为随深度增加而增加的趋势, 但不同生境不同树龄土壤含水量略有差异。特别是在土壤表层, 这种差异最大; 在深度 0–60 cm 之间各个采样点的土壤水分含量都呈增加趋势, 且增加趋势显著; 60 cm 以下其余各层土壤水分含量变化差异显著, 但变化的趋势趋于平缓。在 100–120 cm, 除 HSH₂ 土壤含水量增加外, 其余各采样点的土壤含水量的变化趋势都呈降低趋势。

(2) 通过计算土壤水分的变异系数可以看出, 不同土壤含水量的变异系数在不同层次间有较明显的差异, 且土层越深, 其含水量变化程度越小。

(3) 各土层含水量的分布在空间上存在着较强的相似性, 各土层含水量的空间分布总体上均呈西低东高的空间分布。

致谢: 感谢敦煌市西湖国家级自然保护区管理局袁海峰科长和后坑保护站站长常斐、王志广及相关工作人员在采样中给予的热心帮助与指导。感谢研究生张锐、安建科和曹立国三位同门在野外采样中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲-荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报,

2007, 21(1): 123–127.

- [2] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征: 半变异函数[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 428–438.
- [3] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100–107.
- [4] 冉有华, 李新, 王维真, 等. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析[J]. 地球科学进展, 2007, 24(7): 817–824.
- [5] 常学向, 赵爱芬, 赵文智, 等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌溉被土壤水分状况[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 126–129.
- [6] 马海艳, 龚家栋, 王根绪, 等. 干旱区不同荒漠植被土壤水分的时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 231–234.
- [7] 肖德安, 王世杰. 土壤水研究进展与方向评述[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1182–1188.
- [8] 魏庆莒, 胡杨[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 1–17.
- [9] 唐红莉. 祁连山林区土壤水分生态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003.
- [10] 徐建华. 现代地理学中的研究方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [11] 张正铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] 敦煌市编纂委员. 敦煌市志[M]. 北京: 新华出版社, 1994.
- [13] 马兴华, 王桑. 甘肃疏勒河流域植被退化与地下水位及矿化度的关系[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 53–55.
- [14] 豪树奇. 额济纳绿洲土壤水分状况的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.

(上接第 108 页)

- [4] 黄云, 廖铁军, 傅瓦利. 三峡库区土地开发利用潜力与可持续发展: 以重庆市万州区为例[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 385–388.
- [5] 傅瓦利, 魏朝富. 三峡库区开县土地利用空间优化配置及其生态经济效益的比较研究[J]. 经济地理, 2006, 26(1): 133–136.
- [6] 吴宗法, 杨世港, 谈采田. 移民安置区土地承载力研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(4): 39–44.
- [7] 邱元锋, 罗金耀. 移民安置区土地资源及人口承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2002, 35(6): 50–52.
- [8] 程见尧. 秭归县移民安置区土地承载力及其可持续农业利用[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 1999, 33(3): 11–13.
- [9] 刘传江, 朱劲松. 三峡库区土地资源承载力现状与可持续发展对策[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 522–527.
- [10] William E R. Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability[EB/OL]. <http://www.dieoff.com/page110.htm>, 1997-09-27.

- [11] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 607–616.
- [12] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630–636.
- [13] 赵先贵, 肖玲, 马良煊, 等. 基于生态足迹的可持续评价指标体系的构建[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1202–1207.
- [14] 斯藹, 林年丰, 汤洁, 等. 生态足迹法在可持续发展度量及趋势预测中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 37–40.
- [15] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375–3901.
- [16] 贾永飞, 施国庆, 孙中良, 等. 基于生态足迹的移民安置区生态承载力研究: 以丹江口水库工程淅川库区为例[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 32–36.
- [17] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 37–42.