

不同空间尺度土壤水分与环境因素的关系*

王信增¹ 焦峰^{1,2**} 刘源鑫¹ 朱乐天¹ 林坤¹

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 以延河流域为例, 利用典范对应分析方法对坡面、小流域、区域 3 个尺度的土壤水分与环境因素关系进行研究。结果表明: 坡位、土地利用类型是坡面尺度影响土壤水分变化的主控因素; 坡度、土地利用类型是小流域尺度影响土壤水分变化的主控因素; 蒸散、降水、土地利用类型是区域尺度影响土壤水分变化的主控因素。可见, 随着研究尺度的增加, 坡向、坡位、坡度等地形承担的信息量逐渐流向蒸散、降水等气象因子, 土地利用类型承载的信息量基本未变。结果对土壤水分与水文模型及其尺度外推有重要的意义。

关键词 延河流域; 土壤水分; 不同尺度; 典范对应分析

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)2-0319-05

Relationships between soil moisture and environmental factors at different spatial scales.

WANG Xin-zeng¹, JIAO Feng^{1,2**}, LIU Yuan-xin¹, ZHU Le-tian¹, LIN Kun¹ (¹College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 319–323.

Abstract: Taking Yanhe basin as a case, this paper studied the relationships between soil moisture and environmental factors at slope surface, small watershed, and regional scales by using canonical correspondence analysis (CCA). In the basin, slope position and land use type were the main factors controlling soil moisture change at slope surface scale, slope and land use type were the dominating factors at small watershed scale, while evapotranspiration, precipitation, and land use type were the key factors at regional scale, which suggested that with the enlargement of studied spatial scale, the information contained by topographic factors (slope direction, slope position, and slope) gradually converted to climatic factors (evapotranspiration and precipitation), but the information contained by land use type was almost invariant. This study could have significance in studying soil moisture model and hydrological model and their extrapolation.

Key words: Yanhe basin; soil water; scale; canonical correspondence analysis (CCA).

土壤水分对土壤-植物-大气的水分过程和生物过程有显著作用(杨建锋等, 1999), 是地气之间的水分和能量通量的关键(Illston *et al.*, 2010; Nijssen *et al.*, 2010), 是影响作物生长和植被恢复的重要因素(杨文治和田均良, 2004; 王信增和焦峰, 2011)。因此, 掌握区域土壤水分含量分布, 在水循环和水量平衡研究中有着重要意义。此方面研究在侵蚀严重的半干旱干旱的黄土高原尤为重要(郭庆荣和李玉山, 1994)。

由于土壤水分有异质性(张义等, 2010), 因此研究尺度不同, 主控因子也不同。徐学选等(2003)运用经典统计法对黄土丘陵区土壤水分与环境因素进行研究得出, 降水格局是土壤水分具有南、北向逐渐增加的区域分布特征的主导因子; 邱扬等(2007)对小流域尺度指出土地利用与地形为该尺度主控因子; 张继光等(2006)指出, 土层深度与有机碳含量对坡地土壤水分变异及其季节变化的影响最为显著。这些研究对研究土壤水分异质性有着重要的突破, 研究方法也由经典数理统计(Anderson & Kneale, 1980)、地统计学(Hupet & Vanclooster, 2002)到数量生态学(Qiu *et al.*, 2001)趋势发展。然而, 大多数主要基于某个环境因素或特定尺度, 尤

* 中国科学院西部之光项目(2009y236)、西北农林科技大学科技创新重点项目(QN2011073)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-406)资助。

** 通讯作者 E-mail: Jiaof11@126.com

收稿日期: 2011-08-08 接受日期: 2011-11-22

其是小流域研究甚多,而鲜有在同一个流域不同尺度土壤水分影响因素的信息变化的研究。鉴于此,本研究立足于延河流域,运用典范对应分析方法,分别研究了坡面尺度、小流域尺度、区域尺度的土壤水分与土地利用、气象、地形等因素的时空关系,并且讨论不同尺度土壤水分与多因素的综合影响,以期土壤水分与水文模型及其尺度外推寻找突破口。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究以延河流域($36^{\circ}23'N$ — $37^{\circ}17'N$, $108^{\circ}45'E$ — $110^{\circ}28'E$)为研究区(图1),该流域属于黄河一级支流,全长286.9 km,总面积7687 km²,降水量400~550 mm,年均气温9℃。河网密度约为4.7 km·km⁻²,大陆性气候。区域内黄土丘陵沟壑面积占全流域的90%,从东南向西北,降水、温度具有明显的梯度变化特征。主要土壤为粉沙质黄绵土,土壤侵蚀强烈,典型黄土丘陵区植被区和地貌气候特征。土地利用类型主要有耕地、果园、乔木林地、灌木林地、天然草地等(焦峰等,2005,2009)。由于漫长的流水、风力、重力等侵蚀作用,加之近千年来,人类不合理的土地利用方式,使得地形复杂,沟壑支离破碎。

1.2 样地布设

2010年5—6月,从研究区西北部镰刀湾至东南部张家滩,选典型断面设置10条“V”形样带,从坡底沿坡面至分水岭,约20 m取点,兼顾不同用地类型、地形;并详细记录样点经纬度、地形、土地利用类型、植被名称等信息,实取260个样点进行统计分析;然后在研究区内选一典型小流域——化子坪

(图1,小流域尺度),该流域位于 $37^{\circ}2'N$ — $37^{\circ}5'N$, $108^{\circ}52'E$ — $109^{\circ}4'E$,流域面积80 km²,境内沟壑纵横、川道狭长、梁峁遍布,山高、坡陡、沟深,地形地貌复杂多样,属于典型的黄土丘陵区。另取132个点进行统计分析;根据化子坪的地形和微地貌特征,在小流域中又选择一个典型的坡面——田家圪(图1,坡面尺度),整体落差231 m,主要土地利用类型为农用地与草地。沿坡面自左向右,每隔150 m,依次选取3条纵向线,从坡底取样地至相同的分水岭,另取37个样点。小流域尺度与坡面尺度的样地布设与延河流域相同,不再赘述。

1.3 土壤水分测定方法

采用“土钻法”取样测定样地土壤水分。测深200 cm,每层20 cm,在105℃下烘干至恒重,用精度为0.01 g的电子天平称重,计算土样土壤含水量。

1.4 数据处理

典范对应分析是基于对应分析发展而来的一种排序方法,将对应分析与多元回归分析相结合,每一步计算均与环境因子进行回归,又称多元直接梯度分析。其基本思路是在对应分析的迭代过程中,每次得到的样方排序坐标值均与环境因子进行多元线性回归。

CCA要求两个数据矩阵,一个是土壤水分数据矩阵,一个是环境数据矩阵(张金屯,2004)。本研究不同尺度皆有对应环境数据库,环境数据矩阵为 $P \times N$ 维,其中 N 为样点数, P 为环境因子的数量,包括年均降水(rainaver)、温度(temaver)、蒸散(et)、坡向(aspect)、坡度(slope)、坡位(slopo)、海拔(elev)和土地利用(landuse)8个环境因子。其中坡位、坡向、土地利用3个定性因子需要进行编码处理,其余皆用实测值。坡位以1为下坡、2为中坡、3为上坡;坡向原始记录以朝北为起点(即0°或360°),以1为阳坡(135°~225°)、2为半阳坡(90°~135°、225°~270°)、3为半阴坡(45°~90°、270°~315°)、4为阴坡(0°~45°、315°~360°);土地利用类型以1为乔木林地、2为灌木林地、3为农用地、4为果园用地、5为草地,3种尺度编码一致。坡度、海拔用GPS定位仪得到,降水、温度、蒸散(蒸发量代替)皆由延河流域及周边地区57个气象站点数据,利用ANUS-PLINE空间分析工具插值得到(陈淑娟和温仲明,2011)。

土壤水分数据矩阵亦为 $P \times N$ 维,其中 N 为样点数, P 为不同层次土壤水分含水量,共分5层(0~

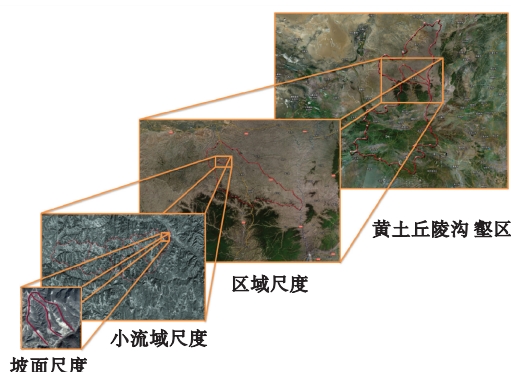


图1 不同尺度样点分布及土壤水分取样示意图

Fig.1 Schematic diagram of sample point distribution of different scales and soil water
坡面尺度红线为样点路线示意图。

20、20 ~ 40、40 ~ 80、80 ~ 140、140 ~ 200 cm 土层)。

本研究采用通用软件 CANOCO, 结合环境因子矩阵, 分别对区域、小流域、坡面尺度进行 CCA 排序, 得出 3 种尺度环境因子、土层、样点的双序图, 分析不同尺度影响土壤水分的主控因子。

2 结果与分析

2.1 坡面尺度土壤水分与环境因子的关系

对坡面尺度土壤水分数据矩阵与环境因子数据矩阵进行 CCA 排序分析。从表 1 可以看出, 环境因子对土壤水分的累积解释量前 2 轴的累计值占特征值总和的 96.9%, 坡度与第 1 排序轴的相关性极显著(0.526)。坡位与第 2 排序轴极显著相关(-0.669), 与土地利用类型显著相关(0.323)。这说明第 1 排序轴着重反映坡度梯度, 第 2 排序轴主要反映坡位与土地利用梯度, 这与孙中峰等(2005)的研究结果相似。

由图 2 可知, 连线长度大小依次为: 坡位、土地利用类型、坡度、温度、降水、海拔、蒸散, 因此可以清楚地看到坡位、土地利用类型是坡面尺度土壤水分的主控因子。土壤水分在坡面上的分布主要受微地形影响(刘春利和邵明安, 2006), 原因在于坡面尺度气象因子差异不大, 不但下垫面对降水进行再分配, 而且不同坡位会引起植被生长环境条件的差异。植被类型的不同引起植被覆盖度以及根系覆盖不同, 导致土壤水分异质。

2.2 小流域土壤水分与环境因子的关系

基于化子坪小流域对其土壤水分与环境因子 CCA 排序得出环境因子对土壤水分的累积解释量前 2 轴的累计值占特征值总和的 94.5%, 基本上能解释绝大部分信息, 如表 2 所示, 第 1 排序轴与坡度

表 1 坡面尺度 CCA 排序前 4 轴与环境因子的相关系数
Table 1 Correlation coefficients of first four CCA axes and environmental factors at slope scale

| 因子 | 第 1 排序轴 | 第 2 排序轴 | 第 3 排序轴 | 第 4 排序轴 |
|-----------------------|----------|-----------|---------|---------|
| 海拔 | 0.076 | -0.071 | -0.147 | 0.069 |
| 坡度 | 0.526 ** | -0.086 | 0.120 | -0.095 |
| 坡位 | -0.015 | -0.669 ** | -0.122 | 0.098 |
| 土地利用类型 | 0.075 | 0.323 * | 0.070 | 0.050 |
| 温度 | -0.101 | 0.066 | 0.260 | -0.100 |
| 降水 | 0.138 | -0.066 | -0.183 | 0.125 |
| 蒸散 | 0.065 | -0.064 | -0.163 | 0.089 |
| 物种-环境相关性的 累积百分比变化率 | 67.2% | 96.9% | 99.8% | 99.9% |

* 表示在 0.05 水平差异显著, ** 表示在 0.01 水平差异极显著。下同。

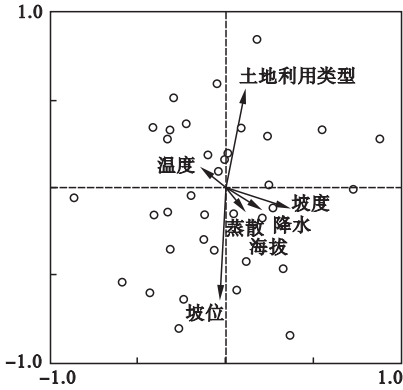


图 2 坡面尺度土壤水分与环境因子双序图
Fig. 2 Biplot of soil water and environmental factors at slope surface scale

箭头连线代表各个环境因子, 与排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小, 夹角越小, 相关性越高, 反之越低; 箭头连线的长度代表环境因子与不同层次土壤水分相关程度的大小, 连线越长, 相关性越大, 反之越小。下同。

极显著相关(0.476); 海拔与第 2 排序轴呈极显著相关性(-0.217)。可见, 第 1 轴主要反映的是坡位的梯度, 第 2 轴则主要反映的是海拔与土地利用类型。

从小流域 CCA 双序图(图 3)可看出, 坡度、土地利用是小流域尺度的主控因子, 而且较于坡面尺度, 气象因子的连线明显变长, 而坡向、坡位逐渐变短。土地利用类型对 0 ~ 20 cm 土层影响较大, 而影响 20 ~ 40、40 ~ 80 cm 土层的环境因子比较模糊, 80 ~ 140、140 ~ 200 cm 土层主要受海拔、坡度影响。小流域地形复杂, 土地利用类型主要以草地及梯田为主, 植被根系分布层较浅, 对浅层土壤水分影响较大, 土壤水分波动亦大(白天路等, 2009); 坡度不同, 对降水进行再分配时, 地表径流与壤中流的分配比例也不同, 随着坡度的增加, 在重力的作用下, 地

表 2 小流域尺度 CCA 排序前 4 轴与环境因子的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of first four CCA axes and environmental factors at small basin scale

| 因子 | 第 1 排序轴 | 第 2 排序轴 | 第 3 排序轴 | 第 4 排序轴 |
|----------------------|----------|-----------|---------|---------|
| 海拔 | 0.023 | -0.217 ** | -0.136 | -0.011 |
| 坡度 | 0.476 ** | -0.024 | 0.043 | 0.003 |
| 坡向 | 0.148 | 0.003 | -0.121 | 0.008 |
| 坡位 | -0.031 | -0.063 | -0.110 | -0.019 |
| 土地利用类型 | -0.025 | 0.168 | -0.095 | -0.013 |
| 温度 | -0.108 | 0.159 | 0.074 | 0.020 |
| 降水 | 0.125 | -0.107 | -0.113 | -0.016 |
| 蒸散 | 0.092 | -0.118 | -0.097 | 0.001 |
| 物种-环境相关性 累积百分比变化率 | 52.1% | 94.5% | 99.9% | 100.0% |

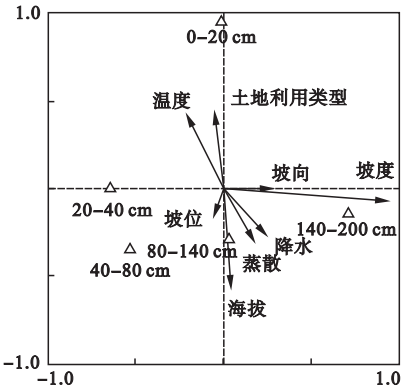


图 3 小流域尺度土壤水分与环境因子双序图
Fig. 3 Biplot of soil water and environmental factors at small basin scale

表径流逐渐增多,因此对深层土壤水分影响较大。

2.3 区域尺度土壤水分与环境因子的关系

随着研究尺度增大至整个延河流域,蒸散、温度、海拔与第 1 排序轴极显著相关,相关系数分别为 0.261、-0.241、0.206。降水(-0.181)、坡向(-0.179)坡位(0.150)与第 1 排序轴显著相关,降水(0.142)与第 2 排序轴显著相关,其余环境因子显著性不大(表 3)。

从图 4 可见,蒸散、温度、降水等气象因子组建成研究尺度下的主控因子,海拔的箭头连线也增至最长,而相比之下,坡度最短,坡向也变得较短。同时,总体可以看出第 1 排序轴主要解释外部水分供给梯度,第 2 排序轴主要解释的是土地利用对土壤水分因子的影响。从第 1 排序轴可以看出,外部水分供给对不同土层水分影响,0~20 cm 土层受降水、蒸散影响最大,20~40、40~80 cm 土层受降雨影响次之,但是 20~40 cm 土层较 40~80 cm 土层受蒸散影响强烈,80~140、140~200 cm 土层受降水影响最小。与坡面尺度相似,20~40 cm 土层受土地利用类型的影响最大。气象因子对整个延河流域土壤水分变化起着决定性的作用,降水几乎是延河流域土壤水分的唯一来源,蒸散是对土壤水分消耗的主要方式,因此对于整个区域而言,合理的干旱指标应包括降水、蒸散、入渗等因素对土壤水分的影响(王春林, 2011)。延河流域降水量有明显随纬度变化趋势,降雨量由北向南递增,徐学选等(2003)研究指出,降水 550 mm 以上的地区在植被上呈现森林景观,550~450 mm 则为森林-草原的过渡范围,降水小于 450 mm 则呈现稀疏灌木和典型草原植被。由此看来,这种过渡性特征在延河流域表现

得十分明显。

图 5 为环境因子与采样点的 CCA 双序图,从样点分布来看,处于延河流域东北部的镰刀湾、化子坪、建华镇的样点基本分布在最右边,这里蒸散最强

表 3 区域尺度 CCA 排序前 4 轴与环境因子的相关系数
Table 3 Correlation coefficients of first four CCA axes and environmental factors at regional scale

| | 第 1 排序轴 | 第 2 排序轴 | 第 3 排序轴 | 第 4 排序轴 |
|---------------------|-----------|---------|----------|---------|
| 海拔 | 0.206 ** | -0.119 | 0.087 | -0.050 |
| 坡度 | -0.008 | -0.005 | 0.186 ** | 0.101 |
| 坡向 | -0.179 * | 0.024 | 0.142 | -0.103 |
| 坡位 | 0.150 * | 0.116 | -0.074 | -0.025 |
| 土地利用类型 | 0.011 | -0.120 | -0.134 | 0.016 |
| 温度 | -0.241 ** | 0.004 | -0.021 | 0.030 |
| 降水 | -0.181 * | 0.142 * | -0.089 | 0.059 |
| 蒸散 | 0.261 ** | -0.079 | 0.042 | -0.051 |
| 物种-环境相关性累积百分比变化率(%) | 51.8 | 80.5 | 97.2 | 100.0 |

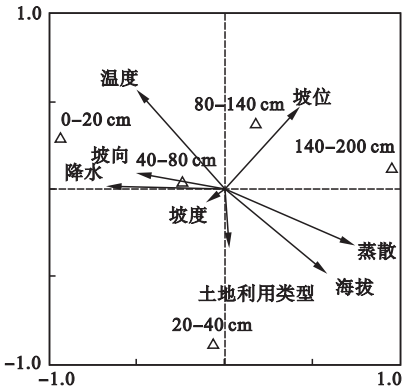


图 4 区域尺度土壤水分与环境因子双序图
Fig. 4 Biplot of soil water and environmental factors at regional scale

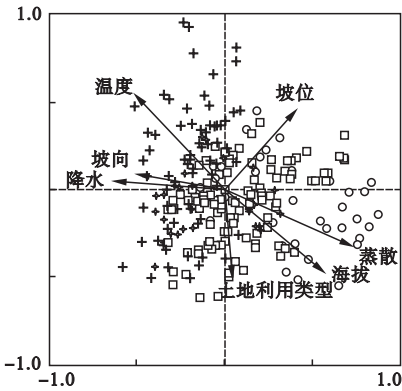


图 5 区域尺度环境因子与样点双序图
Fig. 5 Biplot of environmental factors and sample points at regional scale
圆圈代表镰刀湾、化子坪、建华镇;正方形代表招安、安塞县、高桥;星形代表县南沟;十字代表张家滩、甘谷驿、万花山。

烈、降水较少。而处于中部的安塞县、县南沟、高桥等样点,主要分布于原点周围,这里条件都处于中介。而地处延河流域南端的万花山,降水最多,样点基本分布于最左侧,从另外一个角度阐述了第1排序轴是主要解释外部水分供给梯度。

3 讨论

通过对区域、小流域、坡面尺度进行土壤水分数据矩阵与环境因子数据矩阵进行 CCA 排序,绘制和计算环境因子、土层、样点的双序图,得出以下结论:1)坡位和土地利用类型是坡面尺度下影响土壤水分变化的主控因子,坡度、土地利用类型与海拔是小流域尺度下土壤水分变化的主控因子,蒸散、降水、温度等气象因子是区域尺度下影响土壤水分变化的主控因子。2)较小尺度的土壤水分与微地形关系密切,地形因素因子对土壤水分再分布有着决定性的作用,不同的坡位与坡向,直通光辐射也有显著差异(郭林海,1993)。对于人类强烈干扰的黄土高原来说尤为显著,坡度是唯一能人为改变的地形因子,在小流域尺度下,本研究很好地反映了这个问题。而且随着研究尺度的增加,地形因子中主控因子坡位的信息慢慢转向坡度,降水、温度等气象因子。土地利用类型基本未变。3)随着尺度的增加,坡向、坡位、坡度等地形承担的信息量逐渐流向蒸散、降水、温度等气象因子,土地利用类型承担的信息量变化比较平稳。郭砾等(2006)研究也指出,随着研究尺度的增大,仅地形因子对森林景观格局的可解释性较弱,这皆是由于某一过程的特性是针对某一尺度或尺度域而存在的,在低尺度上观测到的一个特定的非平稳过程,在较大尺度上也许就表现为平稳过程(李双成和蔡运龙,2005)。就如本研究坡面尺度下,气候因子是非平稳过程,但当研究尺度扩大至整个延河流域时,逐渐变为平稳过程。

本研究运用典型对应分析的方法,确定了不同尺度下影响土壤水分分布的主控因子,但是究其本质是一种定性描述,确定了环境因子所承载的信息的流向和信息量的定量变化,尚待进一步的深化和研究。

参考文献

白天路,杨勤科,申佳. 2009. 黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布变异特征及影响因子. 生态学杂志, 28(12): 2508-2514.

- 陈淑娟,温仲明. 2011. 延河流域地带性物种分布对未来气候变化的响应. 水土保持学报, 25(1): 157-161.
- 郭砾,夏北成,刘蔚秋. 2006. 地形因子对森林景观格局多尺度效应分析. 生态学杂志, 25(8): 900-904.
- 郭林海. 1993. 沈阳市东陵区丘陵坡地坡面太阳直射光的分布及其分析. 生态学杂志, 12(1): 59-61.
- 郭庆荣,李玉山. 1994. 黄土高原南部土壤水分有效性研究. 土壤学报, 31(3): 236-243.
- 焦峰,温仲明,王飞,等. 2009. 黄土丘陵区小叶杨生长空间差异性及其土壤环境效应. 水土保持学报, 23(3): 194-199.
- 焦峰. 2005. 基于 GIS 的黄丘区土壤水分制图及其定量化分析. 水土保持研究, 12(3): 129-131.
- 李双成,蔡运龙. 2005. 地理尺度转换若干问题的初步探讨. 地理研究, 24(1): 11-18.
- 刘春利,邵明安. 2006. 六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究. 中国生态农业学报, 14(4): 54-56.
- 邱扬,傅伯杰,王军,等. 2007. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 26(1): 100-107.
- 孙中峰,张学培,刘卉芳,等. 2005. 晋西黄土区坡面尺度土壤水分分布规律研究. 土壤通报, 36(6): 846-849.
- 王春林. 2011. 基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标及其适用性. 生态学杂志, 30(2): 401-407.
- 王信增,焦峰. 2011. 基于有序聚类法的土壤水分剖面划分. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 39(2): 191-196.
- 徐学选,刘文兆,高鹏,等. 2003. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨. 生态环境, 12(1): 52-55.
- 杨建锋,李宝庆,李运生,等. 1999. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用初步研究. 水利学报, (7): 27-32.
- 杨文治,田均良. 2004. 黄土高原土壤干燥化问题探源. 土壤学报, 41(1): 1-6.
- 张义,谢永生,江青龙. 2010. 不同生产力水平苹果园土壤水分空间异质性. 生态学杂志, 29(7): 1326-1332.
- 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 2006. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究. 农业工程学报, 22(8): 54-58.
- 张金屯. 2004. 数量生态学. 北京:科学出版社.
- Anderson M, Kneale P. 1980. Topography and hillslope soil water relationships in a catchment of low relief. *Journal of Hydrology*, 47: 115-128.
- Hupet F, Vanclooster M. 2002. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. *Journal of Hydrology*, 261: 86-101.
- Illston BG, Jeffrey B, Christopher AF, et al. 2008. Mesoscale monitoring of soil moisture across a statewide network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25: 167-182.
- Nijssen B, Schnur R, Lettenmaier DP. 2001. Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model. *Journal of Climate*, 14: 1790-1808.
- Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau. China. *Journal of Hydrology*, 240: 243-263.

作者简介 王信增,男,1985年生,硕士研究生,主要从事土地资源利用与管理、遥感与GIS应用与资源环境信息技术。
E-mail: wangxinzheng_1986@163.com
责任编辑 刘丽娟