

高寒草甸典型小流域土壤水分空间变异对比研究

龙训建<sup>1</sup>, 王根绪<sup>1,2</sup>, 张春敏<sup>1</sup>, 钱 鞠<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 西部环境重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院 山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:**以寒区 2 个典型小流域为例, 根据理论变异函数, 通过 Kriging 空间内插法对比研究小流域 0– 30 cm 层土壤水分空间变异性及其特征。结果表明: (1) 受植被类型、覆盖度影响, 水平方向上, 同一流域不同植被类型土壤含水量分布为高寒灌丛草甸> 高寒嵩草草甸> 退化草地; 相同草甸类型条件下, 纳通河流域平均土壤水分含量均小于跨热洼尔玛流域; 各坡位、坡向草甸植被严重退化区域土壤水分含量均略小于高寒草甸草地。 (2) 从剖面分析, 跨热洼尔玛流域各层土壤含水量均大于纳通河流域; 剖面变异性、土壤水分下渗速度纳通河流域总体均大于跨热洼尔玛流域; 土壤水分变化剧烈程度高寒草甸草地区域在 20– 30 cm 层、植被退化区域 10– 20 cm 层; 土壤水分下渗速度草甸植被严重退化区域大于高寒草甸草地; 高寒草甸草地区域在 10– 20 cm 层土壤水分在下渗过程中有一定的滞后作用; 而草甸植被严重退化区域则无此类情况。

**关键词:**高寒草甸; 土壤水分; Kriging 插值; 空间变异; 对比分析

中图分类号: S714. 2 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2007) 06-0160-04

The Contrast Analysis on the Spatial Heterogeneity of Soil Moisture of Two Comparative Gully Catchments of Alpine Meadow

LONG Xun-jian<sup>1</sup>, WANG Gen-xu<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-min<sup>1</sup>, QIAN Ju<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Take two typical areas in cold region for example, based on theory variation function, and Krige space insert method, study on space variation and characteristics of soil moisture in 0– 30 cm layers of contrast research river basin. It is revealed that: (1) due to the influences of vegetation types and coverage in horizontal direction, soil moisture content distributing of different vegetation type in one basin is: alpine shrub meadow > alpine *K. humul* is meadow > degenerative meadow; the same meadow type in different region, average soil moisture content of natonghe basin is smaller than kuarewaerma basin; and the heavy degenerative region is also smaller than alpine meadow. (2) Analysis on section, soil moisture content in each layer of kuarewaerma region is larger than natonghe region; but variability in section and filter ratio in natonghe are lager than kuarewaerma, and in heavy degenerative region, it is more quickly than alpine meadow; the smart moisture change of alpine meadow is in 20– 30 cm layer, and degenerative region is from 10 to 20 cm; and hysteresis occurs in 10– 20 cm layer of alpine meadow, but wasn't observed in heavy degenerative region.

**Key words:** apine meadow; soil moisture; Krige interpolation; space variation; comparative analysis

土壤水分是水文循环过程和自然植被重要的环境因子之一, 是土地可持续利用、水资源规划与管理研究的基础。土壤水分空间变异性研究一直是水文学、土壤学研究的热点之一<sup>[1]</sup>。由于影响土壤水分空间变异因素很多<sup>[2-4]</sup>, 在不同尺度下, 土壤水分均存在较强空间变异特征<sup>[5-7]</sup>。同时, 土壤水分空间变异性也能反映区域生态功能与景观格局的动态改变<sup>[8-10]</sup>。近几十年来, 由于区域环境气候变化、人类活动影响不断加剧<sup>[11-13]</sup>, 高原高寒草地土壤环境及生态系统的变化成为衡量区域土地资源与环境质量的标准。以植被退化、水土流失和土地荒漠化为代表的生态环境变化成为社会关注焦点<sup>[14-17]</sup>。因此, 分析寒区土壤水分空间变异特征及其对比性对土壤水热变化、植被与气候、土壤的关系<sup>[18]</sup>、植被空间格局<sup>[19]</sup>等研究有重要意义, 对研究区域水源涵养及生态

环境保护提供指导依据。

1 研究区域概况

选择黄河源头达日县境内吉迈镇跨热洼尔玛流域和建设乡纳通河流域(图 1、图 2) 作为对比研究流域。两流域分别地处 99°36'–99°38' E, 33°42'–33°45' N 和 99°25'–99°27' E, 33°38'–33°41' N 之间, 流域面积 19.54 km<sup>2</sup> 和 13.98 km<sup>2</sup>, 流域长度分别为 8.44 km 和 7.64 km<sup>[3, 20]</sup>。研究区域深居内陆, 属寒冷、剧变的高原大陆性半湿润气候, 年平均气温–0.1~–2.3℃, 多年平均降雨量 531~539 mm, 海拔 4 000~4 300 m, 山脊走向明显, 多山涧谷地。地貌特征为典型河漫滩与沟谷交错带。研究流域主要特征情况见表 1<sup>[3]</sup>。跨热洼尔玛流域属以高山柳(*Salix oritrepha*)、金

\*收稿日期: 2006-12-18  
基金项目: 国家自然科学基金项目(90511003); 中国科学院知识创新工程重点项目(KZCX1-SW-04) 资助  
作者简介: 龙训建(1982–), 重庆人, 硕士研究生, 主要从事寒区水资源研究。

露梅(*Dasiphora fruticosa*) 为主的高寒灌丛草甸和以嵩草属(*Kobresia*) 为主的高寒草甸, 植被盖度介于 50%~ 95%, 植被状况基本保持天然状态。位于建设乡的纳通河小流域,

草地植被退化达 70% 以上, 河谷滩地几乎全部为“黑土滩”型退化草地, 植被盖度为 15%~ 50%; 两侧坡地原有植被也已退化为斑块状, 且鼠害严重, 植被盖度为 10%~ 85%。

表 1 小流域主要特征对比

| 流域名称  | 流域面积/<br>km <sup>2</sup> | 流域长度/<br>m | 径流特征/<br>(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 主要植被类型   |           | 主要土壤类型         |       |
|-------|--------------------------|------------|---|----------|-----------|----------------|-------|
|       |                          |            |   | 坡地       | 沟谷        | 坡地             | 沟谷    |
| 跨热洼尔玛 | 19.54                    | 8.44       | 平均 0.199,<br>最大 0.31                        | 高山柳, 金露梅 | 线叶蒿草, 藏苔草 | 高山灌丛           | 高山草甸土 |
| 纳通河   | 13.98                    | 7.64       | 平均 0.096,<br>间歇性河流                          | 高山嵩草     | 退化杂草      | 高山草甸土, 侵蚀高山草甸土 | 侵蚀高甸土 |

区域土壤类型较为单一, 土壤母质以坡积物和残积物为主, 土壤粗骨性强, 坡面上有寒冻锥形土分布, 土层较薄。根据植被覆盖类型与土壤形成条件可分为高山草甸土、高山灌丛草甸土和侵蚀高山草甸土 3 类。跨热洼尔玛流域主要以高山灌丛草甸土为主, 0~ 10 cm 表土范围主要是根系交织密集的草皮层, 富含有机质、腐殖质, 根系密集但未交织成毡状, 土壤较松散, 土体湿润; 10~ 25 cm 土层内, 一般属以灌

木根系为主的腐殖质层, 土质较疏松, 含有少量半风化砾石; 25 cm 以下, 植物根系含量明显减少, 砾石成分增加。建设乡纳通河流域, 广泛分布着侵蚀高山草甸土, 多数分布于向阳缓坡或滩地, 属于因鼠害以及人类活动影响植被严重退化的高山草甸土, 俗称“黑土滩”, 以杂类草和嵩草为建群种, 盖度低于 50%; 0~ 10 cm 层根系较多, 土质疏松, 含砾石, 一般属于石质中壤土; 10~ 20 cm 层根系很少, 多孔, 多砾石。

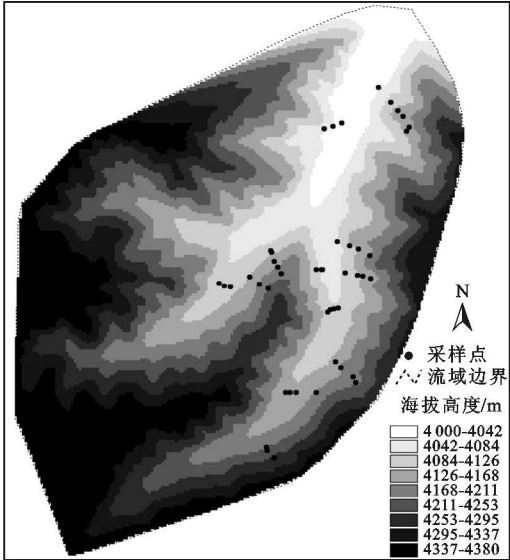


图 1 跨热洼尔玛流域高程和采样点分布

2 研究方法

2.1 样点布设和采样方法

采用样带与样点剖面相结合的方法, 在跨热洼尔玛流域内选择具代表性的 12 个典型样带剖面(图 1), 在纳通河流域选择 6 个典型剖面(图 2)建立采样点。剖面横穿流域两侧不同方向的坡地和河谷滩地类型。用取土钻分层取样收集土壤水分资料, 在每条剖面上依据地形、植被类型及植被覆盖状况布置观测试验点。每个采样点均进行以下观测和试验内容: 植被类型与盖度、海拔、坡地类型、坡位、坡向、近地面风速、土壤含水量、土壤根系层深度、土壤容重以及土壤水分入渗速率等。

每年 7 月期间研究流域植被及其根系发育旺盛, 调查时间确定在 2003 年、2004 年 7 月中旬。在对比流域剖面分别选取 46 个采样点和 33 个采样点, 采用 TDR 法和烘干法测定分析土壤水分。在每个剖面 3 个连续土层(0~ 10, 10~ 20, 20~ 30 cm) 上对样点进行土壤水分剖面分析测定和大地坐标记录。每个剖面测定 3 组数据, 求平均值作为该层土壤水分数据, 同时用烘干法

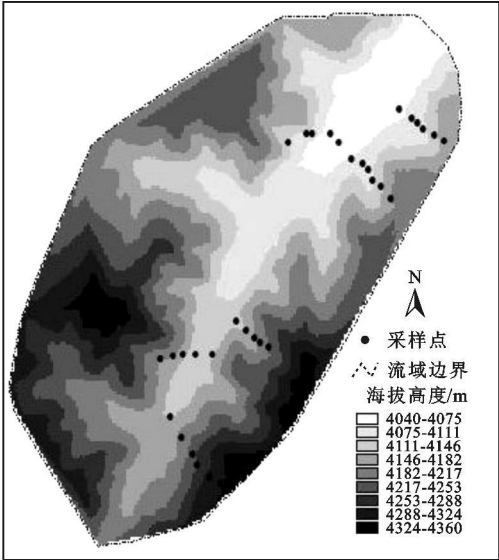


图 2 纳通河流域高程和采样点分布  
和环刀法测土壤重量含水率和土壤容重。

2.2 数据处理过程和分析方法

数据处理工作底图选用比例尺为 1: 50 000 流域地形图。在 ArcGIS 中将样点处理后进行投影和坐标转换, 形成点文件再插入到流域 DEM 图形中。

应用 SPSS 12.0 统计分析软件对土壤水分进行相关性检验(KS test), 并利用 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 模块对土壤水分进行模拟分析。

地统计学中变异函数与 Kriging 法是分析土壤水分空间变异性的基础, Kriging 法是根据待估点邻域内的已知样点数据进行分析, 一般情况下, 邻域内采用的有效数据为 4~ 8 个, 有效距离为 160 m<sup>[13,21]</sup>。

本次空间内插分布图利用 Kriging 最优插值方法, 其待估点内插值为  $x = \sum_{i=1}^n W_i X_i$  式中:  $n$ ——邻域内有效样点个数;  $W_i$ ——邻域内有效样点  $P_i$  的权重系数;  $X_i$ ——样点  $P_i$  的实测值。

在应用 Kriging 法定量描述流域土壤水分变异特征过

程中,关键是建立合适的变异函数的理论模型,根据实验变异函数值进行理论模型曲线确定和最优曲线的选择,流域土壤水分空间变异用经典球面模型分析较为精确。

3 分析与讨论

3.1 数据检查分析

用 SPSS 12.0 统计分析软件分别对跨热洼尔玛流域、纳通河流域土壤水分剖面数据初步进行特征值统计、中心分布趋势、离散程度和 K-S 检验,结果见表 2 和表 3。初步分析结果表明:跨热洼尔玛流域、纳通河流域各层土壤含水量的

表 2 跨热洼尔玛流域土壤含水量统计特征值和 KS 检验

| 埋深/cm  | 最大值/% | 最小值/% | 均值/%  | 中值/%  | 标准差 | 变异系数 | 偏态系数 | 峰度     | KS 值 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-----|------|------|--------|------|
| 0- 10  | 41.48 | 23.27 | 33.46 | 33.47 | 5.0 | 15.0 | 0.7  | 0.9    | 0.53 |
| 10- 20 | 43.67 | 22.57 | 33.68 | 33.03 | 5.2 | 15.5 | 0.26 | - 0.46 | 0.63 |
| 20- 30 | 43.03 | 17.13 | 32.27 | 32.88 | 5.9 | 18.2 | 0.05 | 0.63   | 0.66 |
| 流域平均   | 41.00 | 21.90 | 31.42 | 31.73 | 4.7 | 15.0 | 0.16 | - 0.48 | 0.41 |

表 3 纳通河流域土壤含水量统计特征值和 KS 检验

| 埋深/cm  | 最大值/% | 最小值/% | 均值/%  | 中值/%  | 标准差 | 变异系数 | 偏态系数   | 峰度     | KS 值 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-----|------|--------|--------|------|
| 0- 10  | 45.77 | 19.05 | 32.51 | 32.90 | 6.6 | 20.3 | - 0.14 | - 0.96 | 0.52 |
| 10- 20 | 42.65 | 12.20 | 32.38 | 32.95 | 6.7 | 20.8 | - 0.68 | 0.46   | 0.74 |
| 20- 30 | 39.45 | 19.80 | 30.04 | 30.95 | 5.2 | 17.2 | - 0.15 | - 0.97 | 0.55 |
| 流域平均   | 42.20 | 19.55 | 30.59 | 31.00 | 5.6 | 18.3 | - 0.08 | - 0.84 | 0.49 |

3.2 平均土壤水分空间分布特征对比分析

由于 2 个研究小流域气候条件相似,而植被类型分布与

中值与均值差异较小;标准差都均匀分布在 5.0~ 5.9 和 5.2~ 6.7 之间;总体上跨热洼尔玛流域 0- 30 cm 变异系数随土层厚度的增加而增加;纳通河流域变异系数在 10- 20 cm 为最大;峰度值均小于 3,呈“低峰态”分布;K-S 检验值均大于 0.05,说明两流域剖面土壤水分均符合正态分布。通过以上分析,表明对比流域土壤水分资料具有代表性和合理性,基本上反映了样本总体特征,满足地统计学所要求的平稳假设条件,可进一步进行地统计学分析和比较。

海拔密切相关,对比分析不同植被类型条件下流域平均土壤水分分布特征(图 3、表 4),结果表明:

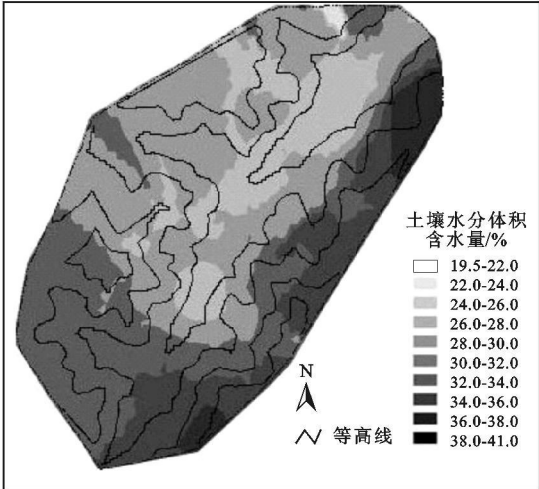
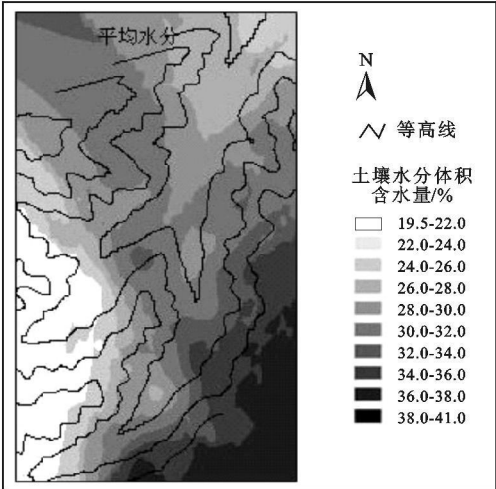


图 3 对比流域平均土壤水分空间分布

表 4 两流域不同坡向、坡位平均土壤水分含量 %

| 坡向<br>(坡位) | 流域名称 | 跨热洼尔玛<br>流域 | 纳通河<br>流域 |
|------------|------|-------------|-----------|
| 阴坡         | 灌丛草甸 | 36.34       | 36.18     |
|            | 蒿草草甸 | 31.42       | 30.32     |
|            | 退化草地 |             | 27.95     |
| 阳坡         |      | 29.37       | 27.86     |
| 沟谷         |      | 24.72       | 24.51     |

(1) 总体上,跨热洼尔玛流域与纳通河流域按坡向的土壤水分含量分布情况为阴坡> 阳坡> 流域沟谷地带。两流域土壤水分含量分别为阴坡 33.88%, 31.48%; 阳坡 29.37%, 27.86%; 沟谷带 24.72%, 24.51%。由以上三组对比数据可知,跨热洼尔玛流域各坡位平均土壤水分含量均略大于纳通河流域。

(2) 在区域环境气候变化、人类活动等因素影响下<sup>[1-13]</sup>,区域平均土壤水分在水平方向上变化十分明显。纳通河流域平均土壤水分介于 19.55%~ 42.20%、变异系数为 18.3%;跨热洼尔玛流域平均土壤水分 21.9%~ 41.00%、变异系数仅为 15.0%。由此表明纳通河流域平均土壤水分含量变异性明显强于跨热洼尔玛流域,也可认为草甸植被严重退化的典型流域平均土壤水分含量空间变异特征显著且含量差异较大。

(3) 植被覆盖度对土壤水分含量及表面蒸散发影响较大,跨热洼尔玛流域植被主要以高山柳、金露梅和小蒿草为主,植被盖度为 50%~ 95%,植被状况基本保持天然状态;纳通河流域草甸植被退化严重,植被盖度变化剧烈,介于 10%~ 85% 之间。而对比流域各坡位平均土壤水分含量,跨

热洼尔玛流域均略大于纳通河流域。表明对比流域植被类型、植被覆盖度的不同使各流域土壤水分含量存在差异性。据此分析可得: 土壤含水量与植被盖度密切相关。增加高寒草甸、草地植被盖度, 将有助于提高土壤含水量。

(4) 退化草甸、草地的土壤含水量明显低于植被状况良好区域; 高寒灌丛草甸、高寒嵩草草甸和退化草地平均土壤水分含量分带明显。同一流域不同植被类型情况下, 其平均土壤水分含量大小关系为高寒灌丛草甸> 高寒嵩草草甸> 退化草地。在相同植被类型不同流域中, 纳通河流域平均土壤水分均小于跨热洼尔玛流域。纳通河流域阴坡高寒灌丛草甸、高寒嵩草草甸和退化草地平均土壤水分含量分别为 36.18%, 30.32%, 27.95%。因此, 草甸、草地类型对土壤水分含量有明显影响。

3.3 流域剖面土壤水分空间分布对比分析

分别测定对比流域 0–10, 10–20, 20–30 cm 3 种深度土层土壤水分, 对不同剖面土壤水分含量进行空间对比分析, 空间分布图分别见图略。

(1) 在 0–10, 10–20, 20–30 cm 各层, 跨热洼尔玛流域平均土壤含水量分别为 33.46%, 33.68%, 32.54%; 纳通河流域为 32.51%, 32.38%, 30.04%。跨热洼尔玛流域 0–10 cm 与 10–20 cm 土壤水分含量空间分布情况与纳通河流域具有相似规律: 土壤水分含量随着土层深度增加而减小。

(2) 从剖面看: 跨热洼尔玛流域 0–10, 10–20, 20–30 cm 各层土壤含水量均大于纳通河流域。低覆盖草地的土壤含水量在不同土层的变化较为剧烈。纳通河流域同一剖面各层变异系数总体上大于跨热洼尔玛流域, 前者分别为 15.0%, 15.5%, 18.2%; 后者为 20.3%, 20.8%, 17.2%; 前者最大变异层在 20–30 cm, 为 18.2%; 后者在 10–20 cm, 为 20.8%。样本间土壤水分含量差异性较大, 这与流域植被类型、植被盖度密切相关; 在相同土层不同植被覆盖度下的土壤水分空间变异性显著。

(3) 跨热洼尔玛流域 20–30 cm 层、纳通河流域 10–20 cm 层土壤水分含量变化最为剧烈, 土壤水分差值分别为 25.9%, 30.4%, 标准差和变异系数均为剖面最大值, 分别为 5.9%, 6.7% 和 18.1%, 20.8%。由此分析得出, 植被类型对剖面土壤水分空间分布影响显著; 不同植被退化程度下, 土壤水分表现出层次变化规律: 轻度、中度退化草地各层土壤含水量变化幅度较小, 其中, 轻度退化草地各土层含水率差值最大为 8.66%, 中度退化草地含水率差值最大则为 8.41%; 而灌丛、嵩草草甸和黑土滩各层之间土壤含水量变化明显, 土壤含水量差值分别达 21.33%, 22.7% 和 15.98%。

(4) 剖面土壤水分下渗速度跨热洼尔玛流域小于纳通河流域。跨热洼尔玛流域各层递减速度为–0.22%, 1.41%; 纳通河流域为 0.13%, 2.34%。前者在 10–20 cm 层土壤含水量增加, 这是由于该流域植被盖度较高, 植物根系较多聚集于该土层, 土壤水分入渗过程中由于受到植物根系的阻滞产生滞后作用。滞后作用使土壤水分入渗速度减慢, 加之降雨过程中易使表层土壤含水量达到饱和, 而黑土滩、退化草地植被稀疏, 植物根系对土壤水分下渗的滞后作用微弱, 导致黑土滩、退化草地比嵩草、灌丛草甸容易产生土壤水力侵蚀, 致使黑土滩、退化草地地表干燥, 水分流失速度加快,

造成水土流失, 不利于植被恢复。

3.4 空间插值分析

应用 Kriging 插值法绘制的实测土壤含水量空间分布图能准确、直观地描述土壤含水量的空间分布。对比分析跨热洼尔玛流域和纳通河流域土壤水分空间分布情况, 从图 3–5 可得土壤水分空间分布呈明显空间规律性: 流域平均土壤水分对比分析表明, 阴坡土壤水分含量明显大于阳坡, 尽管沟谷地带海拔相对较低, 但存在黑土滩, 其土壤水分含量反而最小; 对两流域土壤水分进行剖面对比分析, 应用 Kriging 插值法能较好反映剖面土壤水分空间分布格局。

4 结 论

根据跨热洼尔玛流域和纳通河流域实测土壤水分资料, 分别对比分析水平方向平均土壤水分空间分布特征和垂直方向剖面土壤水分空间分布特征, 得到以下结论:

(1) 流域平均土壤水分空间变异性。在水平方向, 高寒草甸植被类型呈带状分布, 同一流域不同植被的土壤含水量分布为高寒灌丛草甸> 高寒嵩草草甸> 退化草地; 相同草甸类型条件下, 纳通河流域平均土壤水分含量均小于跨热洼尔玛流域。纳通河流域平均土壤水分变异性强于跨热洼尔玛流域; 草甸植被严重退化的纳通河流域平均土壤水分空间变异特征显著、土壤水分含量差异大; 在区域环境气候变化、人类活动影响等因素下, 土壤水分在水平方向上变化显著, 植被覆盖度差异则反映了各流域土壤水分含量差异性。

(2) 剖面土壤水分含量空间分布对比分析得出: 跨热洼尔玛流域 0–10, 10–20, 20–30 cm 层土壤含水量均大于纳通河流域; 剖面变异性、土壤水分下渗速度纳通河流域总体均大于跨热洼尔玛流域; 滞后作用导致跨热洼尔玛流域 10–20 cm 层土壤含水量明显增加; 从土壤水分变化剧烈程度角度看, 跨热洼尔玛流域发生在 20–30 cm 层、纳通河流域则在 10–20 cm 层。水分下渗过程中, 退化草地土壤比嵩草、灌丛草甸更容易发生水力侵蚀, 从而加剧水分流失速度, 使得黑土滩、退化草地地表土壤水分含量减少, 水土流失严重, 形成恶性循环, 极不利于植被恢复。

(3) 用 Kriging 插值法形成的土壤水分空间分布图能直观、简洁地反映出对比研究流域土壤水分在水平方向和垂直方向上的变化情况, 使研究过程简化, 结果明了。

参考文献:

[1] Western A W, Rodger B G. The tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristic sand hydrological flux measurements [J]. Water Resources Research, 1998, 34(10): 2765–2768.

[2] Nyberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment of Gardsion, Sweden [J]. Hydrology Processes, 1996, 10: 89–103.

[3] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653–659.

[4] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 483–492.

变土壤容重的作用大于刺槐林(人工林通过腐殖质作用能够

降低土壤容重),这与以上数据(2.1)得出的结论相吻合。

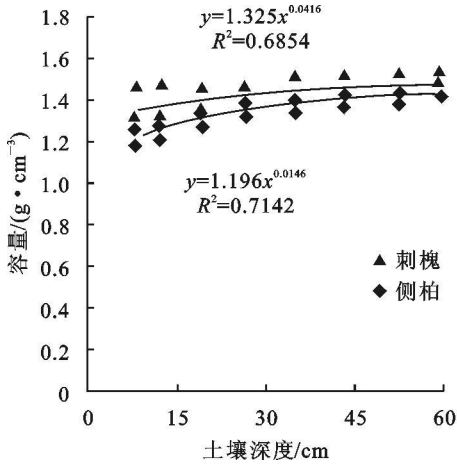


图 1 容重随土壤深度的变化

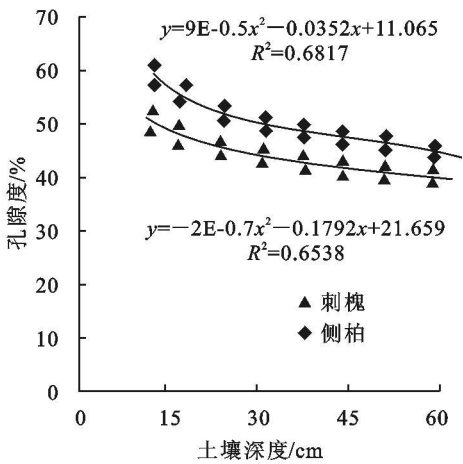


图 2 孔隙度随土壤深度的变化

3 讨论

泉山自然保护区内不同人工林下土壤类型的时间变化规律不一,即土壤容重与孔隙度在不同的时间段所表现出的动态规律不一致。一方面与该保护区林地类型的植被特性、种植时间的长短及其取样的时间间隔有关,另一方面由于土壤结构存在着空间异质性,对土壤容重与孔隙度到底有多大的影响,还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 贺康宁. 水土保持林地土壤水分物理性质的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(3): 44- 50.  
[2] 游秀花, 蒋尔可. 不同森林类型土壤化学性质的比较研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(3): 357- 360.

[3] 阎传海. 徐州泉山自然保护区评价[J]. 生态科学, 1998, 17(1): 70- 75.  
[4] Hant B, Walmsly T J, Bradshaw A D. Importance of soil physical conditions for urban tree growth, in Hodge[ J]. Research for Practical Arboriculture. Forestry Commission Bulletin, 1991, 97: 51- 62.  
[5] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景区森林景观土壤物理性质异质性及其分形特征[J]. 林业科学, 2005, 41(5): 175- 179.  
[6] 刘鸿雁, 黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2041- 2046.

(上接第 163 页)

[5] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the tarawarra catchment[ J]. Journal of Hydrology, 1998, 205: 20- 37.  
[6] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture[ J]. Journal of Hydrology, 1999, 217: 203- 224.  
[7] 傅伯杰, 王军, 马克明. 黄土丘陵区土地利用对土壤水分的影响[J]. 中国自然科学基金, 1999, 13(4): 225- 227.  
[8] Miller R E, VerHoef J M, Fowler N L. Spatial heterogeneity in eight central Texas grasslands[J]. Journal of Ecology, 1995, 83: 919- 928.  
[9] Dutilleul P, Legendre P. Spatial heterogeneity against heteroscedasticity: an ecological paradigm versus a statistical concept[ J]. Oikos, 1993, 66: 152- 167.  
[10] 王根绪, 郭晓寅, 程国栋. 黄河源区景观格局与生态功能的动态变化[J]. 生态学报, 2002, 22(10): 1587- 1598.  
[11] 程国栋, 王根绪, 王学定, 等. 江河源区生态环境变化与成因分析[J]. 地球科学与进展, 1998, 13(增刊): 24- 31.  
[12] 王根绪, 沈永平, 程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 200- 204.  
[13] 沈永平, 王根绪, 吴青柏, 等. 长江- 黄河源区未来气

候下的生态环境变化[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 308- 314.  
[14] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 江河源区的生态环境变化及其综合保护研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001.  
[15] 王根绪, 程国栋, 沈永平. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1771- 1777.  
[16] 王一博, 王根绪, 常娟. 人类活动对青藏高原冻土环境的影响[J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 523- 527.  
[17] 王一博, 王根绪, 沈永平, 等. 青藏高原高寒区草地生态环境系统退化研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 633- 640.  
[18] Legendre P, Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis[ J]. Vegetation, 1989, 80: 107- 138.  
[19] Fortin M J, Draperal P, Legendre P. Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology[ J]. Vegetation, 1989, 83: 209- 222.  
[20] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银, 等. 长江- 黄河源寒区径流时空变化特征对比[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 414- 422.  
[21] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 用空间内插法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征[J]. 自然科学进展, 2002, 12(4): 430- 433.