

拉萨河流域耕地不同尺度土壤水分影响因子*

付国珍^{1,2} 摆万奇^{1**} 姚丽娜³

(¹中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室,北京 100101; ²中国科学院大学,北京 100049; ³中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要 土壤水分影响因子的尺度差异及作用是其尺度依赖性研究的基础.本文以青藏高原拉萨河流域耕地土壤为对象,通过遥感影像分析和野外调查,在全流域和小流域尺度上分别布设样点 115 和 49 个,采用土钻法分 3 层(0~20、20~40、40~60 cm)抽取土壤样本,获取土壤水分含量,然后运用生态学冗余分析和统计分析,筛选出影响耕地土壤水分的主要因子.结果表明:在全流域尺度,受气候、海拔影响,土壤水分呈西南-东北递增趋势,其中,河谷区耕地受河流侧渗补给影响,下层土壤水分高于上层;在小流域尺度,耕地土壤水分随海拔升高及坡度增大而减少,土壤贮水能力随石砾含量增多而减弱.研究结果为拉萨河流域耕地向高海拔扩张、作物结构调整、土地整理及灌溉设施布设提供了重要依据.

关键词 青藏高原;拉萨河流域;耕地;土壤水分;影响因子;冗余分析

文章编号 1001-9332(2015)07-2115-08 **中图分类号** S151.9 **文献标识码** A

Factors influencing soil moisture at different scales of the Lhasa River basin, China. FU Guozhen^{1,2}, BAI Wan-qi¹, YAO Li-na³ (¹Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(7): 2115-2122.

Abstract: The scale difference and role of factors influencing soil moisture regime are the basis of scale dependency study. This study, which selected farmland soils in the Lhasa River basin of the Tibetan Plateau as the research object, identified the main factors affecting the soil moisture using ecological redundancy analysis (RDA) and statistic analysis methods, based on data obtained by remote sensing technology and field surveys. The soil layers of 0-20, 20-40 and 40-60 cm were collected with the soil-drilling method at each of 115 sampling sites distributed in the whole basin of the Lhasa River and 49 sampling sites in one of its sub-watersheds. The results showed that soil moisture content in the Lhasa River basin, under the influence of climate and altitude, increased from southwest to northeast, and was higher in the lower soil layer than the upper layer due to water supplement by lateral seepage of the river. At sub-watershed scale, farmland soil water content decreased with increasing the altitude and slope, and soil water storage capacity decreased with increasing the gravel content. The results were a significant support for the farmland expansion to higher altitude, adjustment of cropping structure, land consolidation, and construction of irrigation facilities in the region.

Key words: Tibetan Plateau; The Lhasa River basin; farmland; soil moisture; influence factors; ecological redundancy analysis (RDA).

土壤水分是全球水循环过程中土壤-植被-大气

(SPAC)系统的重要组成部分,在气候变化的背景下,其空间变异性在流域复杂地形^[1]、水文、土壤^[2]、作物^[3]等因子的影响下显著增大.拉萨河流域河谷农业是青藏高原重要商品粮基地,区域内旱涝并存,土壤水分空间变异性较大,对于农业生产空间

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030500)、国家自然科学基金项目(41371120)和国家科技支撑计划项目(2013BAC04B01)资助.

** 通讯作者. E-mail: baiwq@igsnr.ac.cn

2014-08-01 收稿,2015-03-07 接受.

规划与作物布设具有较高要求.由于土壤水分空间变异具有尺度依赖性^[4],探索其影响因子的作用也需考虑尺度性.

尺度依赖性 是土壤水分影响因子研究的难点.目前国内外的相关研究多集中于单一尺度,如景观尺度^[5]、集水区尺度^[6]、流域尺度^[7]、坡面尺度^[8]等.以研究较多的黄土高原土壤水分空间变异为例,姚雪玲等^[8]坡面尺度的研究认为,主要影响因子为植被类型;刘鑫等^[9]小流域尺度的研究结果认为,土壤水分与坡向相关性达到 0.8 以上;邱扬等^[10]关于景观尺度的研究表明,土壤水分空间异质性是坡度、坡位和高程共同作用的结果,说明在同一研究区域,不同尺度上土壤水分的主要影响因子不同.单一尺度的研究对于阐明该尺度上影响因子的作用机理做了较多探索,但其规律仅适用于特定尺度,难以外推.有学者对多尺度^[11]研究进行探索,如 Das 等^[12]分析了不同水文气象条件下的土壤水分状况,Zhu 等^[13]开展了断面到地块尺度的土壤、地形及作物对土壤水分的影响研究,Joshi 等^[14]探索了地块、流域和区域 3 个尺度不同地形和作物对土壤水分的影响.以往的研究方法多为网格法规则采样,即通过改变采样幅度和间距的“再采样”方法^[15]进行半变异分析,所得结果与选择的幅度和密度有很大关系,受主观影响较大;研究内容均是探索单个或少数因子对土壤水分的作用,缺乏对影响因子的筛选,难以系统把握不同尺度的主要影响因子,削弱了对实践的指导意义.

本研究以气候变化脆弱区拉萨河谷地区耕地为对象,其中拉萨河流域与子流域达孜德庆镇小流域形成了天然的不同尺度嵌套关系,在土壤水分空间基本分布及统计的基础上,运用生态学冗余分析(RDA)和统计学相关性分析筛选得到两个尺度的主要影响因子,分别探索与各自尺度土壤水分的关系,明确了不同尺度土壤水分影响因子的差异及作用机理,对流域影响因子尺度依赖性研究予以扩充,以期研究区因地制宜地利用、改善和提高土壤水分状况提供一定的参考依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

拉萨河位于雅鲁藏布江中游左岸,是受断裂控制的“S”型格状水系,流域范围为 29°20'—31°15' N、90°05'—93°20' E^[16].拉萨河流域气候以半干旱、半湿润气候为主,太阳辐射强烈,日照时间长,常年气

温偏低,四季不分明,日温差大,年降水量 340~700 mm,降水主要集中于夏半年^[17],年均蒸发量大,达 660~1268 mm.西南-东北方向可划分为 4 个气候类型区,分别为温和半干旱区、温凉半干旱区、湿凉半湿润区、冷凉半湿润区^[18](图 1).研究区耕地位于拉萨河流域中下游河谷区,面积约 650 km²,占整个流域面积的 2%.耕地分布的最大特点是覆盖广、曲度大、破碎度高,且高差变化大(海拔在 3600~4300 m).土壤类型主要为草甸土、草原土和潮土,土壤石砾含量较高,主要作物有青稞、小麦、油菜、豌豆、蚕豆等,水分为作物生长的重要限制因子.在耕作管理中,主要以引河水漫灌、沟灌或雨养为主,水利设施相对薄弱.

1.2 数据来源

本文的基础数据包括流域边界、耕地分布、河流分布、气候类型区、数字高程模型(DEM)及坡度坡向数据.其中,流域边界、耕地分布及河流分布来源于美国地质调查局(USGS)2011年的TM卫星遥感图像,经过假彩色合成、影像融合、几何校正、目视解译而获得^[18];气候类型区的划分依据《西藏拉萨土地资源》^[16]描述而空间化;DEM数据(30 m分辨率)来源于国际科学数据平台(ISDSP),并利用 ArcGIS 10.1 软件提取了坡度和坡向.

土壤水分及石砾含量数据来自于野外实地采样及实验室测定.在拉萨流域及其子流域达孜德庆镇小流域内采用随机抽样法,分别布设采样点数为 115 和 49,分 3 层(0~20、20~40、40~60 cm)用土钻法获取.由于研究区土层较薄,故部分采样点未能取得 20~40 或 40~60 cm 层土样,取样时间段为 2013 年 8 月 10 日—9 月 10 日.其中,一份土壤样品于当天

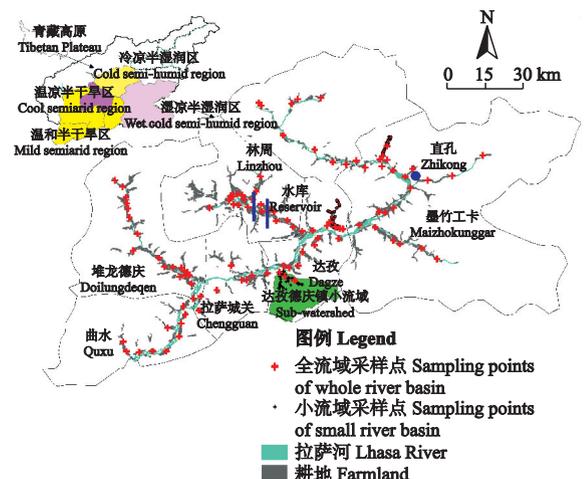


图 1 研究区概况及采样点布设

Fig.1 Study area and sampling points layout.

带回实验室,在 105 ℃ 下烘干测土壤含水量,其公式为:土壤水分=(土壤鲜质量-土壤干质量)/土壤干质量;另一份土样在自然状态下风干,过 2 mm 筛,获得土壤石砾含量(>2 mm)。

1.3 研究方法

本文将流域生态学的理论引入到土壤水分影响因素尺度研究中,利用流域具有客观自然的界线、流域与子流域在形态和结构上具有自相似性两个原理,选择拉萨河流域与其嵌套子流域达孜德庆镇小流域作为两个研究尺度。

运用 SPSS 16.0 进行皮尔逊(Pearson)相关性分析,得到两个尺度土壤水分与定量因子的相关系数及显著性水平;应用生态学软件 Canoco 4.5 进行冗余分析(RDA),得到土壤水分与环境因子的 RDA 排序图,直观获得其相关性。二者结合筛选出主要影响因素,减少了只用相关性代表因果关系而引起的判断错误。在此基础上,采用 SigmaPlot 10.1 绘制主要影响因素与土壤水分的关系图。

Canoco 模型的选择一般根据区间去趋势分析得到的梯度长度值决定,如果该值小于 3,说明线性模型合适。冗余分析(RDA)为线性模型的直接排序,能独立保持各个变量对生物群落变化的贡献率,把该方法引入到土壤水分与环境因子关系研究中^[19]效果较好。本研究通过 RDA 排序图中环境因子的长短可以直观得出其影响力的大小,与土壤水分夹角的余弦正负代表相关性的正负。

2 结果与分析

2.1 耕地土壤水分的基本特征

研究区不同尺度土壤水分在水平和垂直方向均存在一定规律及差异(表 1)。水平方向上,土壤水分均值变动范围为 14.2%~16.9%,变异系数为 24.0%~35.3%,属中等变异($0.1 \leq CV \leq 1$);与小流域尺度相比,全流域尺度表层土壤水分平均值小、变

异系数大、偏度系数趋于 0、峰度系数趋于 1,说明全流域尺度表层土壤水分为中等变异,空间分布较为随机,采样数据的代表性强;而小流域尺度表层土壤水分值较高,空间分布较为偏态。垂直方向上,土壤水分自表层向下均值为波动型^[20]先减后增,变异系数递减,偏度系数递增,说明土壤水分受地上部分降雨、灌溉和地下部分河流补给共同作用,且表层影响因素众多,空间变异性强;下层离群值多,较为偏态。

2.2 耕地土壤水分影响因素的筛选

2.2.1 冗余分析(RDA) RDA 排序图显示不同尺度不同层次土壤水分影响因素有差异(图 2)。对两个尺度土壤水分进行去趋势分析,得到的梯度长度均<3,故选择冗余分析(RDA);经过蒙特卡罗置换检验,RDA 排序达到显著水平($P < 0.05$),故结果可信。全流域尺度表层(0~20 cm)土壤水分正相关因子主要为经度、纬度、高程,负相关因子为距河流距离、灌溉等;中层(20~40 cm)土壤水分正相关因子为经度、纬度,负相关因子为作物、坡向等;下层(40~60 cm)土壤水分正相关因子为坡度,负相关因子为坡向、作物等。达孜德庆镇小流域尺度表层(0~20 cm)土壤水分正相关因子主要为土壤类型,负相关因子为海拔、坡度、土壤石砾含量等;中层和下层(20~40、40~60 cm)土壤水分正相关因子为坡向、土壤类型,负相关因子为土壤石砾含量。

2.2.2 皮尔逊(Pearson)相关分析 由表 2 可以看出,在全流域尺度,上、中层(0~20、20~40 cm)土壤水分与纬度、经度均呈显著正相关,主要通过降雨、蒸发等气象因子影响土壤水分的空间分布;中、下层(20~40、40~60 cm)土壤水分与距河流距离均呈显著负相关,说明河流主要补给下层土壤水分,且距河流越远,能补给的河流及地下水越少。在小流域尺度,表层(0~20 cm)土壤水分与海拔、坡度呈显著负相关,与土壤石砾含量也为负向关系。

相关分析结果与 RDA 得到的主要影响因素基

表 1 研究区不同尺度土壤水分统计特征

Table 1 Statistics of soil moisture at different scales

研究尺度 Study scale	土层深度 Soil depth (cm)	样本数 Samples number	平均值 Mean (%)	最大值 Maximum (%)	最小值 Minimum (%)	中值 Median (%)	标准差 SD (%)	变异系数 Variation coefficient (%)	偏度系数 Skewness	峰度系数 Kurtosis
拉萨河流域	0~20	113	15.8	26.9	4.7	16.0	5.6	35.3	0.01	-1.02
Lhasa River	20~40	109	14.9	30.2	5.7	14.1	4.5	30.1	0.61	1.07
basin	40~60	82	15.2	30.9	7.1	14.9	4.5	29.3	1.41	0.53
达孜德庆镇小流域	0~20	49	16.9	24.4	4.7	16.8	5.2	30.7	-0.48	-0.51
Sub-watershed	20~40	47	14.2	26.3	6.2	14.2	3.4	24.0	0.78	2.81
	40~60	38	15.0	30.0	9.0	14.8	3.7	24.4	1.82	6.89

表 2 不同尺度土壤水分与影响因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of soil moisture and environmental factors at different scales

研究尺度 Study scale	土层深度 Soil depth (cm)	样本数 Sample number	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude	坡度 Slope	距河流距离 Distance to river	土壤石砾含量 Soil gravel content
拉萨河流域 Lhasa River basin	0~20	113	0.340 **	0.291 **	0.137	-0.119	-0.179	0.010
	20~40	109	0.291 **	0.210 *	0.076	0.029	-0.214 *	
	40~60	82	0.109	0.095	-0.120	0.092	-0.278 *	
小流域 Sub-watershed	0~20	49	0.505 **	-0.377 **	-0.509 **	-0.354 *	-0.493 **	-0.265
	20~40	47	-0.091	-0.095	-0.003	-0.124	0.050	
	40~60	38	-0.143	0.116	0.095	0.052	0.104	

** $P < 0.01$; * $P < 0.05$.

本一致,二者结合筛选得到全流域尺度的主要影响因子为经纬度、海拔、距河流距离,小流域尺度的主要影响因子为海拔、坡度、土壤石砾含量。

2.3 全流域尺度土壤水分的影响因子

2.3.1 水平分布的主要影响因子 拉萨河全流域包含不同气候类型区,其气温、降雨、蒸发等有较大差异,进而引起土壤水分空间分布呈西南-东北方向递增趋势。由图 3 和图 1 可知,南北方向上,土壤水分从高到低依次为:拉萨河中游的湿凉半湿润区 > 北部的冷凉半湿润区 > 下游的温和半干旱区,其原因为湿凉半湿润区的直孔(图 1)为研究区降水量高值

中心(年降水量达 620.8 mm),向北向南减少,年降水量低达 350 mm;而蒸发量呈西南-东北递减的趋势,湿润度由 0.6~0.7 减少到 0.3~0.4。另外,东西方向上,西侧的湿凉半干旱区的土壤水分略高于东侧的湿凉半湿润区,与林周南部虎头山水库、卡则水库及胜利干渠形成的平原区排灌系统有关。在气象因子的作用下,研究区西南方位的曲水、堆龙德庆、拉萨城关及达孜的表层土壤水分值较低,而东北方向林周、墨竹工卡的土壤含水量较高,土壤水分空间差异较大。这与表 2 所得经纬度是研究区土壤水分空间分布的主要影响因子的结论一致。

2.3.2 垂直分布的主要影响因子 全流域耕地分布于拉萨河干流及支流两侧(图 4),由于河流补给存在差异而形成涝旱并存的现象。对拉萨河干流及支流两侧耕地表层(0~20 cm)与下层(40~60 cm)土壤水分值进行比较,如果下层值 > 上层值,说明下层土壤水分来源不仅有上、中层的下渗,还有地下水的补给。由图 4 可知:沿主干流两侧,下层土壤水分高于表层的比例较大;而侧支流两侧,基本是表层土壤水分大于下层。说明主干流两侧宽阔河谷区耕地有

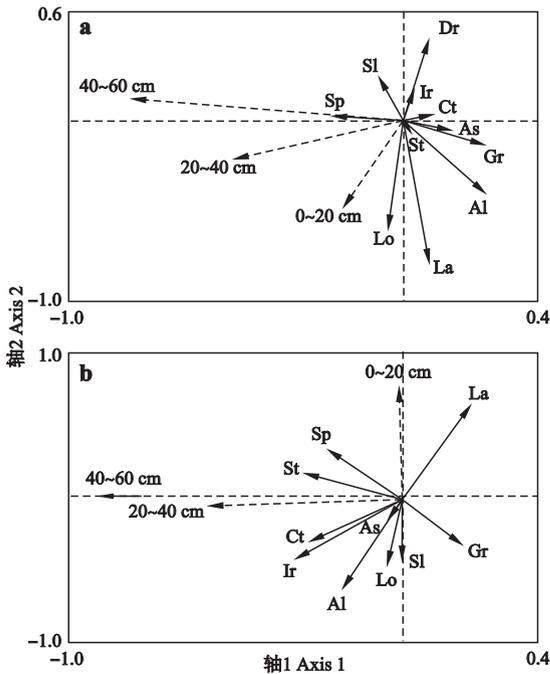


图 2 不同土层土壤水分与环境因子 RDA 排序图

Fig.2 Two-dimensional RDA ordination diagram of soil moisture under different layers and environmental factors.

a) 拉萨河流域 Lhasa River basin; b) 达孜德庆镇小流域 Sub-watershed. 下同 The same below. La: 纬度 Latitude; Lo: 经度 Longitude; Al: 海拔 Altitude; Sl: 坡度 Slope; As: 坡向 Aspect; Gr: 土壤石砾含量 Soil gravel content; Sp: 土粒含量 Soil particle content; Ct: 作物类型 Crop type; St: 土壤类型 Soil type; Ir: 灌溉 Irrigation; Dr: 距河流距离 Distance to river.

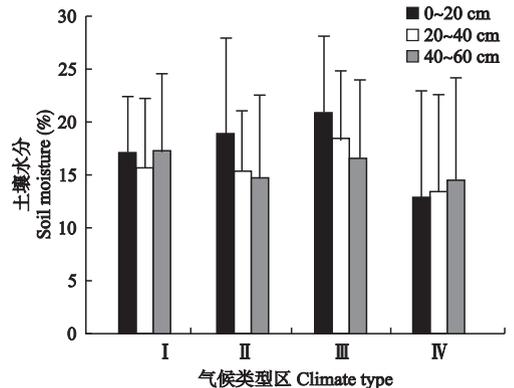


图 3 不同气候类型区土壤水分

Fig.3 Soil moisture in four climate types.

I: 冷凉半湿润区 Cold semi-humid region; II: 湿凉半湿润区 Wet cold semi-humid region; III: 湿凉半干旱区 Cool semiarid region; IV: 温和半干旱区 Mid semiarid region.

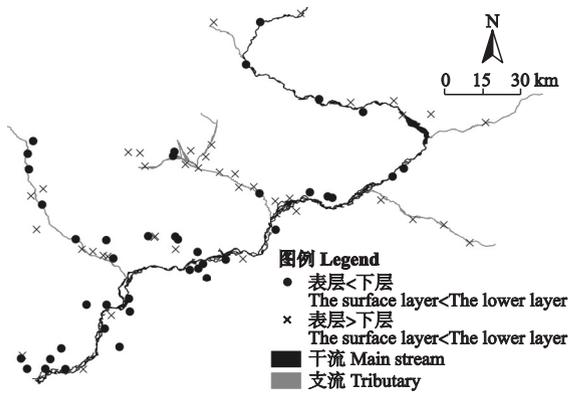


图4 沿河流两侧表层与下层土壤水分比较

Fig.4 Surface and lower layers' comparison of soil moisture on both sides of river.

较大的河流流量侧渗补给,引起下层水分较高;侧支流两侧耕地由于分布于海拔较高区域而难以得到河流补给,故形成了沿河区涝害与沟谷内干旱并存的现象.这与表2所得的土壤水分与距河流距离自表层向下负相关性增大的结果一致.

2.4 小流域尺度土壤水分的主要影响因素

2.4.1 水平分布的主要影响因素

表层土壤水分与海拔在全流域尺度上呈正相关,在小流域尺度上呈显著负相关(图5).在全流域尺度,土壤水分随海拔总体呈递增趋势,这是近35年拉萨河流域耕地向更高海拔的上游扩张^[18]的重要基础.在小流域尺度,土壤水分主要来自降雨形成的地表径流和壤中流,在重力作用下向下坡位移动,海拔越低、汇流面积越大,土壤水分越高,在3485~3900 m海拔范围内,随海拔升高表层土壤水分由21.9%显著降低到13.5%,相关系数为-0.509 ($P < 0.01$) (表2).

全流域尺度上坡度对土壤水分的影响较弱,在小流域尺度上土壤水分随坡度增大而降低(图6).

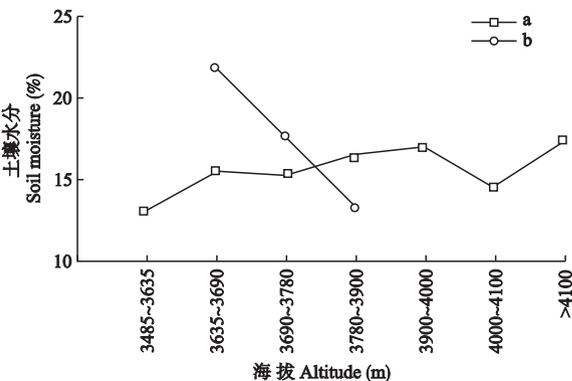


图5 不同尺度表层土壤水分与海拔的关系

Fig.5 Relation between soil moisture of surface layer and altitude at different scales.

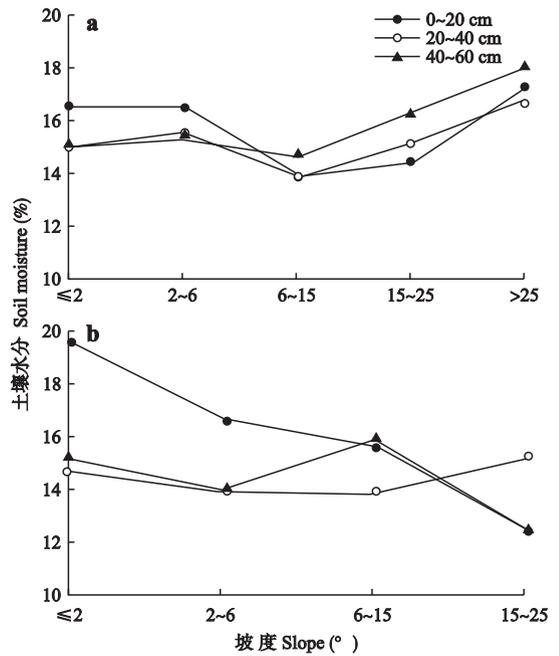


图6 不同尺度土壤水分与坡度的关系

Fig.6 Relation between soil moisture and slope at different scales.

根据《土地利用现状调查技术规程》^[21]的耕地坡度分级标准,得到两个尺度土壤水分随坡度变化规律.在全流域尺度,土壤水分随坡度变化的规律性不强,说明该尺度上坡度并非主要影响因素,这由表2二者较低的相关系数也可说明.在小流域尺度,土壤水分随坡度增大而降低,其中表层呈显著负相关关系(表2),原因在于较陡坡度处排水较快,土壤仅能保持相对较低的含水量^[22];下层土壤受质地、作物根系等影响,递减规律出现波动.

2.4.2 垂直分布的主要影响因素

石砾含量对土壤水分的影响在全流域尺度上规律性不明显,在小流域尺度上随石砾含量增大垂直方向迁移更顺畅.石砾含量通过孔隙度间接影响土壤水分垂直运输的下渗和蒸发.由图7可以看出,在全流域尺度,无论土壤水分自表层向下递增或递减,其石砾含量并无显著差异.原因为研究区土壤石砾受多变的水文条件和微域地形影响形成了“三步一小变,五步一大变”^[16]的空间格局,引起土壤水分空间分布规律性较弱.在小流域尺度,土壤水分自表层向下递增较多集中于石砾含量较高的采样点,土壤石砾含量均值为16.4%,单个样点处高达20%~53.8%;土壤水分自表层向下递减的石砾含量均值为13.4%.说明土壤石砾含量越大,表层土壤贮水能力越差,土壤水分向垂直方向迁移越顺利;反之,迁移受阻挡.

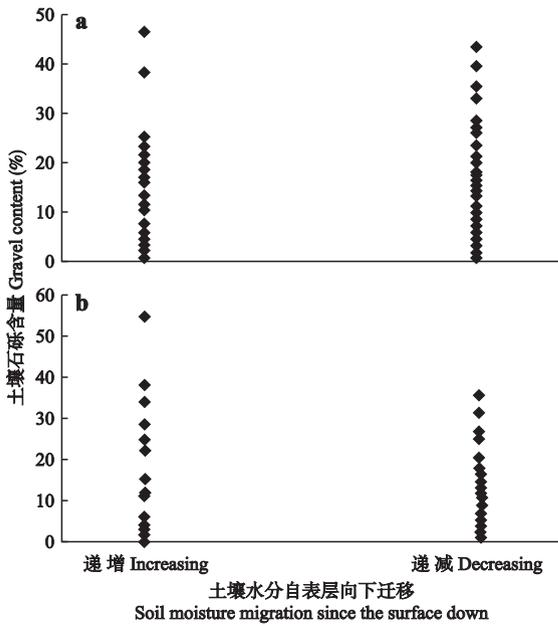


图7 土壤水分垂直迁移与石砾含量的关系
Fig.7 Relation between vertical migration of soil moisture and gravel content.

3 讨论

本研究以拉萨河流域及其子流域达孜德庆镇小流域的耕地为研究区,对两种尺度上土壤水分主要影响因子的差异及作用进行研究.结果表明,两个尺度土壤水分的主要影响因子均不相同.拉萨河流域尺度上,气候和河流是影响土壤水分空间变异的主要因子,在水平方向上呈西南-东北的递增趋势,垂直方向上呈现河流两侧下层水分高于表层的格局;达孜德庆镇小流域上,土壤水分的主要影响因子为海拔、坡度和土壤石砾含量,水平方向土壤水分随海拔升高和坡度增加而递减,垂直方向随石砾含量增

大而迁移增强.

除了本文探索的气象、河流、海拔、坡度、土壤石砾含量5个土壤水分影响因子外,也不可忽略其他因子的作用.土壤水分是由损失和补给相互作用决定^[23],根据研究区先验知识、野外调查及数据分析得到土壤水分来源与去向的直接和间接影响因子关系图(图8).全流域尺度上,在气象因子及河流补给形成了基本的空间格局之下,地形、土壤、作物、人类活动等多因子作用,加大了该尺度土壤水分的空间分异性.小流域尺度上,气象因子并无差异,地形因子的海拔改变降水分布、坡度影响径流、坡向重新分配水热条件,土壤因子的土壤类型、石砾含量、土层厚度等影响其蒸发与贮水能力,作物的覆盖及类型差异引起土壤蒸发和作物蒸腾的不同.相比于全流域尺度,小流域尺度的影响因子较少,且作用较为精细,这也验证了表1中全流域尺度土壤水分的空间变异性大于小流域尺度.

各影响因子对土壤水分的作用机理较为复杂.影响因子会通过交互作用促进^[24]或削弱^[25]对土壤水分的影响,如本研究中海拔与表层土壤水分的关系,在小流域尺度上为负相关,原因为海拔越低,汇流面积越大,土壤水分含量增大,这与大部分研究结果一致^[26];而在全流域尺度上为正相关,得出土壤水分随海拔升高而增大的结论.考虑到全流域尺度海拔升高与降水增加、蒸发减少方向的一致性,可能是气象因子掩盖了海拔对土壤水分的真实影响.故土壤水分与海拔在不同尺度下没有一致性的规律^[27].另外,影响因子会有直接或间接作用,如降水直接影响土壤水分来源,关系较为简单;而坡向通过作物和土壤进而影响水分的蒸发和蒸腾,作用较为复杂.总之,土壤水分空间分布是多个影响因子协同

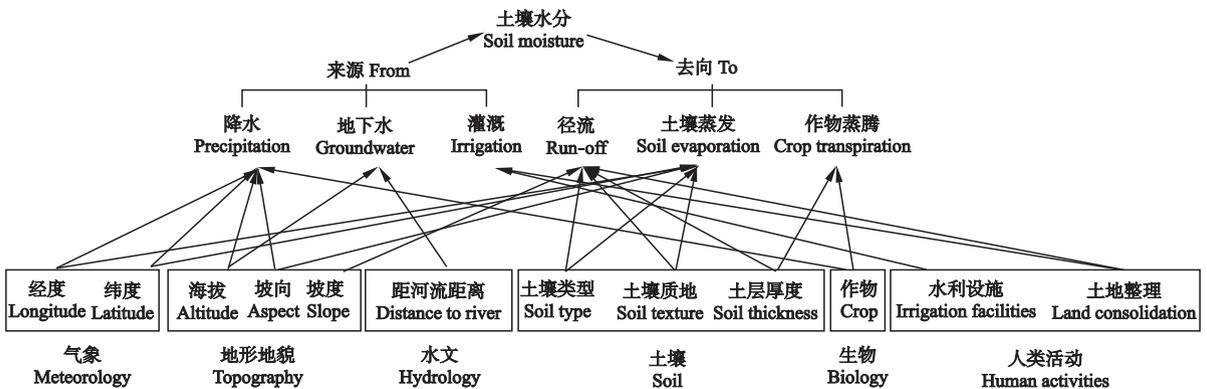


图8 拉萨河流域耕地土壤水分与影响因子关系图
Fig.8 Diagram of relations between soil moisture and impact factors in farmland of Lhasa River basin.

与拮抗、直接与间接作用的结果。

本研究结果具有一定的理论和实践意义。在理论方面,通过定性定量相结合的方法筛选出土壤水分的主要影响因子,并对其尺度效应进行了深入分析,同时,把自然流域嵌套模式引入到尺度研究中,为山区土壤水分研究的尺度选取提供了一种新思路。在实践方面,青藏高原拉萨河流域耕地分布面积较少,主要沿河流及沟谷两侧分布,曲度大、破碎化程度高,空间上旱涝并存,土壤水分是其农业发展的制约因素,研究结果可以为当地农业宏观规划与微观布局提供依据。在全流域尺度,气象及海拔引起的西南-东北土壤水分递增对于耕地向高海拔扩张起到积极作用,沟谷及河谷下层土壤的旱涝差异是安排深浅根系、旱涝作物的依据;在小流域尺度,高海拔与陡坡度土壤水分较低,适合耐旱作物或品种,而土壤石砾含量较高引起土壤贮水能力差应通过土地整理或掺粘的方式改善。相比于同是水分限制型的黄土高原地区,二者主要影响因子差异显著,黄土高原地区土壤水分主要受降雨、土层厚度、地形的影响,而青藏高原地区沿河流分布及石砾含量较高是其区别于其他山区耕地的显著特点。

由于野外条件限制无法连续监测,本研究只能取得采样点瞬时数据,在采样频率上存在一些局限,而土壤水分具有时间依赖性^[28],揭示的规律可信度可能降低;但也有连续监测研究表明,尽管不同时间段含水量不同,但总体趋势是大者仍大、小者仍小^[29]。在以后的研究中,应加强连续性测量,以得到更加稳定的土壤水分影响因子作用规律及尺度效应。

参考文献

- [1] Lanni C, McDonnell J, Rigon R. On the relative role of upslope and downslope topography for describing water flow path and storage dynamics: A theoretical analysis. *Hydrological Processes*, 2011, **25**: 3909–3923
- [2] Pan YX, Wang XP. Factors controlling the spatial variability of surface soil moisture within revegetated-stabilized desert ecosystems of the Tengger Desert, Northern China. *Hydrological Processes*, 2009, **23**: 1591–1601
- [3] Ivanov VY, Fatichi S, Jenerette GD, et al. Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the “homogenizing” effect of vegetation. *Water Resources Research*, 2010, **46**, doi: 10.1029/2009WR008611
- [4] Shi H-B (史海滨), Chen Y-X (陈亚新). Spatial variability and estimation of information of linear-nonstationary soil moisture in farm field. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 1996, **12**(3): 81–86 (in Chinese)

- [5] Brocca L, Morbidelli R, Melone F, et al. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *Journal of Hydrology*, 2007, **333**: 356–373
- [6] Fu BJ, Wang J, Chen LD, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2003, **54**: 197–213
- [7] Takagi K, Lin HS. Changing controls of soil moisture spatial organization in the Shale Hills Catchment. *Geoderma*, 2012, **173**: 289–302
- [8] Yao X-L (姚雪玲), Fu B-J (傅伯杰), Lv Y-H (吕一河). Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2012, **32**(16): 4961–4968 (in Chinese)
- [9] Liu X (刘鑫), Bi H-X (毕华兴), Li X-Y (李笑吟), et al. Variation of soil moisture in relation to topographic factors in Loess region of west Shanxi. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2007, **44**(3): 411–417 (in Chinese)
- [10] Qiu Y (邱扬), Fu B-J (傅伯杰), Wang J (王军). Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2001, **12**(5): 715–720 (in Chinese)
- [11] Korres W, Reichenau T, Schneider K. Patterns and scaling properties of surface soil moisture in an agricultural landscape: An ecohydrological modeling study. *Journal of Hydrology*, 2013, **498**: 89–102
- [12] Das NN, Mohanty BP, Njoku EG. Profile soil moisture across spatial scales under different hydroclimatic conditions. *Soil Science*, 2010, **175**: 315–319
- [13] Zhu Q, Lin H. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales. *Geoderma*, 2011, **163**: 45–54
- [14] Joshi C, Mohanty BP. Physical controls of near-surface soil moisture across varying spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02. *Water Resources Research*, 2010, **46**: 12503–12506
- [15] Guo D-L (郭德亮), Fan J (樊军), Mi M-X (米米霞). Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe Oasis, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2013, **24**(5): 1199–1208 (in Chinese)
- [16] Lhasa Agriculture and Livestock Bureau of Tibet Autonomous Region (西藏自治区拉萨农牧局). Lhasa Land Resources in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993 (in Chinese)
- [17] Shu S-J (舒守娟), Yu Z-F (喻自凤), Wang Y (王元), et al. A statistic model for the spatial distribution of precipitation estimation over the Tibetan complex terrain. *Chinese Journal of Geophysics (地球物理学报)*, 2005, **48**(3): 535–542 (in Chinese)
- [18] Bai W-Q (摆万奇), Yao L-N (姚丽娜), Zhang Y-L (张懿锂), et al. Spatial-temporal dynamics of cultivated land in recent 35 years in the Lhasa River Basin of Tibet. *Journal of Natural Resources (自然资源学报)*, 2014, **29**(4): 623–632 (in Chinese)
- [19] Xu M-H (徐满厚), Xue X (薛娴). Correlation

- among vegetation characteristics, temperature and moisture of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(10): 3158-3168 (in Chinese)
- [20] Chen J (陈佳), Shi Z-H (史志华), Li L (李璐). Effects of soil thickness on spatiotemporal pattern of soil moisture in catchment level. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(7): 1565-1570 (in Chinese)
- [21] National Agricultural Zoning Committee (国家农业区划委员会). Technical Specification of Land Use Investigation. Beijing: China Standards Press, 1984 (in Chinese)
- [22] Famiglietti J, Rudnicki J, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**: 259-281
- [23] Mu X-M (穆兴民). Interaction of soil and water conservation measures with soil water in the Loess Plateau in China. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2000, **16**(2): 41-45 (in Chinese)
- [24] Huang Y-L (黄奕龙), Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰). Spatial pattern of soil water and its influence factors in a gully catchment of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2005, **20**(4): 483-492 (in Chinese)
- [25] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 2004, **285**: 199-214
- [26] Hu X-M (胡相明), Zhao Y-Y (赵艳云), Cheng J-M (程积民). Impacts of environmental factors on spatial distribution of soil moisture of grassland in Yunwu Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(7): 2964-2971 (in Chinese)
- [27] Niemann KO, Edgell MC. Preliminary analysis of spatial and temporal distribution of soil moisture on a deforested slope. *Physical Geography*, 1993, **14**: 449-464
- [28] Hu W (胡伟), Shao M-A (邵明安), Wang Q-J (王全九). Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2006, **17**(1): 74-81 (in Chinese)
- [29] Zhu S-J (朱首军), Ding Y-F (丁艳芳), Xue T-Q (薛泰谦). Study on spatial variability and temporal stability of soil moisture in agri-forestry. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2000, **7**(1): 46-48 (in Chinese)

作者简介 付国珍,女,1989年生,硕士研究生.主要从事土地利用与覆被变化研究. E-mail: fuzg.12s@igsnr.ac.cn

责任编辑 杨弘
