



甘肃敦煌西湖荒漠-湿地生态系统土壤水分空间异质性及其影响因子研究

孙飞达¹,陈文业^{2,3,4*},袁海峰^{4,5},窦英杰^{4,5},
邴丹晖^{2,3,4},冯颖^{2,3,4},吴婷^{4,5}

(1 四川农业大学 草业科学系,成都 611130;2 甘肃省林业科学研究院,兰州 730020;3 甘肃林研科技工程公司,兰州 730020;4 甘肃敦煌西湖国家级自然保护区管理局,甘肃敦煌 736200;5 甘肃敦煌西湖湿地生态系统国家定位观测研究站,甘肃敦煌 736200)

摘要:土壤水分是内陆荒漠区湿地生态系统中重要的限制因子,为了揭示该区域土壤水分空间分布特征,采用传统统计学和地统计学相结合的方法,对甘肃敦煌西湖国家级自然保护区 0~200 cm 内各层土壤水分的空间变异性及海拔、土壤质地和植被对其的影响进行了研究,旨在为极干旱区湿地生态系统植被修复和保育提供科学依据。结果表明:(1)本研究所得各变量的变异系数、块金方差、基台值、变程和结构比分别为 36.51%~88.65%、0.007~0.098、0.112~0.549、116~453 和 76.6%~97.6%,各变量均为中等变异,存在高度异质性,具有较强空间自相关。(2)深层(60~200 cm)土壤水分含量较浅层(0~60 cm)变异大,且不同层次土壤水分含量的空间异质性差别也较大,空间变异主要发生在较小尺度上(分维数 D 在 1.902~1.989 之间)。(3)海拔是影响该区域深层土壤水分空间变异的主导因子。(4)土壤质地与浅层(0~60 cm)土壤水分含量的相关性大于与深层(60~200 cm)土壤含水量的相关性,它们与海拔相关性表现相反;草本植被盖度与浅层土壤水分含量呈较高的正关联关系,灌木根量与深层土壤水分含量呈较高的负关联关系。

关键词:敦煌西湖;荒漠-湿地生态系统;土壤水分;空间异质性;环境因子影响

中图分类号:Q948.11

文献标志码:A

Spatial Heterogeneity of Soil Moisture and Related Factors in Desert-Wetland Ecosystem Enclosed in Dunhuang Xihu, Gansu, China

SUN Feida¹, CHEN Wenye^{2,3,4*}, YUAN Haifeng^{4,5}, DOU Yingjie^{4,5},
BING Danhui^{2,3,4}, FENG Ying^{2,3,4}, WU Ting^{4,5}

(1 Department of Grassland Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Gansu Forestry Science and Technology Research Academy, Lanzhou 730020, China; 3 Gansu Forestry Science and Technology Engineering Company, Lanzhou 730020, China; 4 Administrative Bureau of Dunhuang Xihu National Nature Reserve of Gansu, Dunhuang, Gansu 736200, China; 5 National Positioning Observation Station of Xihu Wetland Ecosystem in Dunhuang of Gansu, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: Soil moisture is the dominant limiting factor of desert-wetland ecosystems in the inland. Based on the traditional and geographical statistics methods, we measured soil moisture ranged from 0 to 200 cm

收稿日期:2015-10-27;修改稿收到日期:2016-01-10

基金项目:甘肃省科技重大专项计划(1302FKDA035);甘肃省科技支撑计划-社会发展类项目(1011FKCA136)

作者简介:孙飞达(1978—),男,博士,副教授,主要从事草地资源监测与管理研究。E-mail:sunfd08@163.com

*通信作者:陈文业,学士,副研究员,主要从事生态恢复研究。E-mail:gschwy@163.com

depth to find the rules of their spatial distribution characteristics, and surveyed some associated environmental factors such as altitude, soil texture and related vegetation indices in desert-wetland ecosystem at Xihu district, Dunhuang National Nature Reserve of Gansu Province, which may be helpful to vegetation restoration, protection and sustainable management in wetland ecosystem at extreme arid areas. The main results were as follows: (1) the coefficients of variation, Nugget variance, sill, range and spatial dependence were ranged from 36.51% to 88.65%, 0.007 to 0.098, 0.112 to 0.549, 116 to 453 and 76.6% to 97.6%, respectively, and all their variables were at a medium variation level and a high heterogeneity and strong spatial autocorrelation was appeared. (2) The variability of soil moisture in the deep soil profile at 60 to 200 cm was higher than those in the shallow layer at 0 to 60 cm, which kept much more differences at different layers, especially in some small scales. (3) The altitude was a dominant factor that influenced the variation of deep soil moisture trend. (4) The relationships between soil texture and soil moisture in deep soil at 60 to 200 cm were stronger than those of shallow layers at 0 to 60 cm, otherwise, which did not comply with the factor of altitude; there were a great positive correlation between the herbage coverage and the soil moisture in shallow soil layers, but a negative correlation between the root biomass of shrub and the soil moisture in deep soil layers.

Key words: Dunhuang Xihu; ecosystem desert and wetland; soil moisture; spatial heterogeneity; influence factors

空间异质性是指系统或系统属性在空间上的复杂性和变异程度,包括系统属性的空间组成,空间构型和空间相关^[1-3]。土壤水分空间异质性是土壤重要属性之一^[3-4],水在干旱半干旱地区极具敏感性,是生态系统中最活跃的因素,是反映土壤特性的重要指标^[5],对该区域植被恢复与建设以及经济持续发展具有极大的限制性^[6]。在不同尺度上研究土壤水分空间异质性,对了解植被与土壤水分的关系具有重要的参考价值^[3,7]。土壤水分的空间异质性研究一直是国际上水文学和土壤学研究的热点问题,随着地统计学方法的出现,采用该方法对土壤水分空间变异性的研究逐渐增多^[8],国内外很多学者对不同类型生态系统的土壤水分空间异质性做了大量的研究工作^[9],如高寒区^[10]、荒漠绿洲区^[11]、农牧交错带^[12]、黄土区^[1]、荒漠区^[13-14]、喀斯特地貌区^[15]等,但整体来看,研究对象的类型并不多,尺度范围也较窄,对不同深度层土壤水分变异性的研究较少^[9]。尤其是对荒漠区湿地生态系统土壤水分空间变异性研究则鲜见报道。

甘肃敦煌西湖国家级自然保护区(以下简称敦煌西湖)地处甘肃河西走廊最西端,西接库姆塔格沙漠和罗布泊,南接阿克塞哈萨克族自治县,北连新疆维吾尔自治区。该区域湿地属于沼泽湿地,是内陆干旱地区的典型湿地类型,具有极干旱区湿地生态系统和荒漠生态系统的典型性和代表性,区位优势明显、特殊。土壤水分是该区域植被生长重要的限制因子,调控着植被的组成、分布、结构及其系统稳定性。本研究采用了传统统计学和地统计学相结

合的方法,定量研究了敦煌西湖0~200 cm土层不同层次水分的空间异质性,以期进一步深入研究研究区植被与土壤水分的相互关系,旨在了解研究区土壤水分空间分布特征,为极干旱区湿地生态系统植被修复和保育提供科学依据。

1 研究区自然条件

敦煌西湖面积为 $6.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中湿地面积 $9.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$,芦苇沼泽 $3.43 \times 10^4 \text{ hm}^2$,四周均被沙漠和戈壁所隔绝。地理坐标为: $92^{\circ}45' \sim 93^{\circ}50'E$, $39^{\circ}45' \sim 40^{\circ}36'N$,区内海拔 $820 \sim 2359 \text{ m}$,地势南高北低,中间为冲积平原。地处北半球暖温带干旱气候区,属典型的大陆性气候,年平均气温为 9.90°C ,最低气温 -30°C ,最高气温 40°C ;年均降水量 39.90 mm ,蒸发量 2486 mm ;年均风速 2.20 m/s ,大风日数 15.40 d ;年日照时数为 $3115.0 \sim 3246.7 \text{ h}$,日照率 $70\% \sim 73\%$;年总辐射量为 641.84 kJ/cm^2 ,干燥度大于 16 。植物区系归属于泛北极植物区中的亚洲荒漠植物亚区,具有鲜明的温带荒漠性质,敦煌西湖共记录有种子植物 23 科 61 属 80 种。土壤主要为沼泽土,另有部分草甸土分布于河漫滩等地。主要保护对象为湿地生态系统、荒漠生态系统及其野生动植物^[16]。

2 研究方法

2.1 样地布设

从盐池湾开始,向南设置长 1.6 km 、宽 300 m 的调查样带,植被包括沼泽、盐沼、草甸、阔叶林荒漠

5种植被型组。在样带内,沿样带方向设置3条平行样线,按南北、东西间隔100 m取样,共有450个样点,并以每个样点为中心设置50 m×50 m样地。按照“五点法”在每个样地内设置5根直径50 mm、深度2.2 m的土壤水分测定管。

2.2 土壤水分含量测定

土壤含水量采用CNC503B(DR)新型智能中子水分仪测定。按0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180、180~200 cm深度分层测定;每个样地每层测定5个样点,取其平均值作为样地该次该层的土壤含水量。最后将算得的土壤水分含量和土壤贮水量用于空间变异性分析。土壤贮水量的计算公式为: $S=0.1hmd$,式中:S为土壤储水量(mm)、h为土层厚度(20 cm)、m为质量含水量(%)、d为该土层土壤容重(环刀法,环刀规格:直径50.46 mm×高50 mm,容积100 cm³)^[17]。依据该公式分别计算出各层的土壤贮水量,然后累加计算出2 m土层的水分贮量。

2.3 植被调查

每个样地采用样方与样线相结合的方法进行植物的种类、密度、盖度、频度和高度等调查^[16],在交叉样线处均匀设置6个20 m×20 m样方进行灌(乔)木调查,并设置9个5 m×5 m样方进行草本植物调查。

2.4 地下水埋深调查

每个样地用土钻打至地下水水流出现,待水位稳定后测量地下水埋深。

2.5 根系生物量的调查

采用全挖法。①灌木调查:在样方中选择大小相近、生长旺盛的植株5株,离植株20 cm处垂直向下挖一剖面,把根系分布层分为0~60 cm和60~200 cm 2层;②草本调查:在样方内选择地势平坦、植被相对集中的区域,由上向下按30 cm×50 cm×20 cm挖取土柱,深度以无植株根系为限,直至200 cm深处。剪取各层所有根系,分层装袋,在室内冲洗、晾晒、烘干后称重。

2.6 土壤粒径分析

每个样地每层采集5个样点土样充分混合(表层土壤直接取样,深层采用挖剖面和土钻法相结合的方式取样),用四分法取大约1 kg样品,室内风干,对土壤粒径用MS-S激光粒度分析仪(英国马尔文Malvern仪器有限公司)进行分析^[18]。

为了便于分析比较,主要考虑不受降水影响,每

年的9、10月份是当地降水量相对最少的时期,加之该时期研究区植被生长旺盛,所以在2013年的10月5日至10月25日期间对研究区植被特征与土壤特性调查及土样采集同步进行。在调查的同时,用GPS定位,并记录各样地的经纬度、海拔高度、地貌及土壤类型等生境因子。

2.7 分析方法

采用GS⁺进行地统计学变异函数数据分析。统计分析分两步骤:①对土壤水分等数据用单样本方法进行正态分布检验(SPSS 13.0软件);②变异函数的计算,用于估计半方差的公式为^[19-21]:

$$r(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^n[Z_i-Z_{(i+h)}]^2 \quad (1)$$

式中,r(h)为半方差函数;N(h)是距离等于h时的点对数,Z_i是样点Z在位置i的实测值,Z_(i+h)是与i距离为h处样点的值。

本研究中球状模型(公式2)和指数模型(公式3)土壤水分等数据符合要求。球状模型的变程等于相关距离a;而指数模型并不表现出有限变程,但实践中变程值近似用3a表示。

$$r(h)=\begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0+C\left[\frac{3h}{2a}-\frac{h^2}{2a^3}\right] & 0 < h \geq a \\ C_0+C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

$$r(h)=\begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0+C^{(1-e^{-\frac{h}{a}})} & h < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,C₀为块金值(nugget),C₀+C为基台值,a为相关距离。

分维数D的计算由变异函数和步长h之间的关系确定,即:

$$2r(h)=h^{4-2D} \quad (4)$$

上式取双对数后再对双对数曲线进行线性回归,得到回归直线的斜率k,分维数可用斜率k估算:

$$D=1/2(4-k) \quad (5)$$

分维数D的大小可用于度量生态变量的复杂程度,D值越小,变量的空间依赖性越强,其空间格局相对简单。通过分形维数可分析生态因子在不同尺度上的差异^[19-20]。

3 结果与分析

3.1 土壤水分的空间变异性特征

3.1.1 土壤水分状况 表1显示,垂直方向上,各样点土壤水分含量均随土层加深而增大,同一样点相邻土层土壤水分含量变化不大,土壤水分含量均

值为 14.873%，介于 6.681%~23.004% 之间，2 m 土层水分贮量平均值为 163.598 mm，介于 65.588~248.188 mm 之间。一般认为， $CV < 0.1$ 为弱变异性， $0.1 \leq CV \leq 1$ 为中等变异性， $CV > 1$ 为高度变异性^[22]，土壤水分含量变异系数(CV)介于 39.28%~88.65%，随土层加深显逐渐增大趋势，说明研究区各样点土壤剖面各层土壤水分含量的空间变异性在增大。2 m 土层水分贮量变异系数(CV)为 36.51%(表 1)，变异系数显示，研究区土壤水分含量和 2 m 土层水分贮量变异相对较高，均为中等变异性。深层(60~200 cm)土壤水分含量的变异较浅层(0~60 cm)土壤水分含量的变异大，说明深层土壤具有较高的土壤水分含量和较大的变异程度，而浅层土壤水分状况较差且变异程度较小。

3.1.2 土壤水分空间结构特征 根据研究区野外调查数据计算实际变异函数，分别用不同类型的模型进行拟合，得到最佳拟合模型的参数值见表 2，结果显示，0~60 cm 各土层土壤水分含量、2 m 土层贮水量和植被盖度的理论模型符合指数模型，而 60~200 cm 各土层土壤水分含量的理论模型符合球状模型。

垂直方向上，11 层土层土壤水分含量及 2 m 土层贮水量的块金方差(C_0)介于 0.007~0.098 之间，表明各层土壤水分含量及 2 m 土层贮水量存在高度的异质性，这种异质性在各要素块金值中也可以看出，各要素的基台值($C_0 + C$)介于 0.112~0.549 之间。0~60 cm 各土层土壤水分含量的块金方差和基台值较 60~200 cm 土层的低，且各值均差别不大，而 60~200 cm 各土层土壤水分含量的块金方差

和基台值差别均较大，表明 60~200 cm 各土层土壤水分含量随机部分的空间异质性和总的空间异质性程度较高，且不同层次土壤含水量的空间异质性差别也较大。本研究所得各变量的结构比介于 0.766~0.976 之间(表 2)，表明研究区各土层土壤水分含量和 2 m 土层贮水量具有较强的空间自相关。整体上看，研究区 2 m 土层贮水量的结构比最小(0.766)，说明对于 2 m 土层贮水量由随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的比例比其他变量大^[23~25]。

变程是表示植被特征与土壤水分空间异质性的尺度^[26~27]。表 2 显示，研究区各土层土壤水分含量和 2 m 土层贮水量异质性尺度不同且值均较小，变程介于 116~453，2 m 土层贮水量与各层土壤水分含量变程(a)比较，相对较大。

D 表示变异函数曲线的曲率大小^[27]。表 2 显示，0~60 cm 各土层土壤水分含量、2 m 土层贮水量的分形维数(D)较小(1.883~1.934)，说明空间变异主要发生在较大尺度上，而 60~200 cm 各土层土壤水分含量的分形维数(D)较大(1.902~1.989)，说明空间变异主要发生在较小尺度上，即沿样带相邻点间的土壤水分含量差异很大。

3.2 研究区土壤水分空间异质性影响因素分析

3.2.1 海拔 用 GPS 测量研究区所有样点的海拔高度，其中最高点海拔为 1 050.38 m，最低点海拔为 880.43 m。图 1 显示，随着海拔递增，各土层土壤水分含量和 2 m 土层贮水量均呈下降趋势，2 m 土层贮水量变化趋势较明显。

海拔是影响土壤水分含量分布的环境因子之

表 1 研究区剖面各层土壤水分含量的统计特征

Table 1 Description statistics of soil water contents along vertical profile and vegetation in study area

项目 Item	土壤层 Soil layer/cm	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 $CV/\%$	最大值 Max	最小值 Min	偏态系数 Skewness	峰态系数 Kurtosis
土壤水分含量 Soil water contents/%	0~10	6.681	3.306	40.02	12.675	3.865	-1.91	-1.67
	10~20	7.622	3.464	39.28	13.220	3.936	-3.93	-1.22
	20~40	11.001	5.261	43.32	19.626	5.222	4.36	1.62
	40~60	13.316	4.585	48.92	20.217	5.520	6.82	2.21
	60~80	14.327	4.459	51.57	20.352	5.754	7.66	3.87
	80~100	15.378	4.517	54.76	20.633	5.961	5.27	2.40
	100~120	15.956	4.747	48.22	21.351	6.274	5.70	6.86
	120~140	17.237	4.927	52.27	22.718	6.520	6.47	2.26
	140~160	18.641	5.638	79.47	25.126	6.929	7.25	2.12
	160~180	20.435	7.106	82.87	32.676	7.292	8.27	3.76
	180~200	23.004	8.766	88.65	41.230	7.322	6.35	1.23
2 m 土层贮水量 Soil moisture storage in 2 m/mm		163.598	53.079	36.51	248.188	65.588	2.18	-0.42

一,许多研究已表明土壤水分含量与海拔之间具有负的相关关系^[18,28-29]。图2显示,浅层土壤水分含量(10~60cm)和深层土壤水分含量(60~200 cm)均与海拔有负的相关关系($P<0.01$),随着海拔递

增,深层土壤水分含量与海拔的相关性呈递增趋势且更高,而浅层土壤水分含量则变化相反,且海拔与深层(60~200 cm)土壤水分含量的相关性大于浅层(0~60 cm)土壤湿度的相关性。

表2 土壤水分含量变异函数理论模型及参数

Table 2 Parameters and model of semivariogram for soil water contents and vegetation

项目 Item	土壤层 Soil layer/cm	理论模式 Theory model	块金方差 Nugget variance (C_0)	拱高 Sagitta (C)	基台值 Sill (C_0+C)	空间结构比例 Spatial dependence $C/(C_0+C)/\%$	变程 Range (a)	分维数 Fractal dimension (D)
土壤水分含量 Soil water contents/%	0~10	指数模型 Index model	0.018	0.227	0.245	92.7	238	1.922
	10~20	指数模型 Index model	0.015	0.097	0.112	86.6	214	1.934
	20~40	指数模型 Index model	0.019	0.198	0.217	91.2	185	1.921
	40~60	指数模型 Index model	0.007	0.282	0.289	97.6	120	1.883
	60~80	球状模型 Spherical model	0.019	0.332	0.351	94.6	138	1.957
	80~100	球状模型 Spherical model	0.012	0.306	0.318	96.2	228	1.968
	100~120	球状模型 Spherical model	0.023	0.409	0.432	94.7	291	1.961
	120~140	球状模型 Spherical model	0.098	0.409	0.487	84.0	116	1.902
	140~160	球状模型 Spherical model	0.031	0.420	0.451	93.1	129	1.948
	160~180	球状模型 Spherical model	0.056	0.462	0.518	89.2	218	1.978
	180~200	球状模型 Spherical model	0.039	0.510	0.549	92.9	172	1.989
2 m 土层贮水量 Soil moisture storage in 2 m/mm		指数模型 Index model	0.048	0.157	0.205	76.6	453	1.914

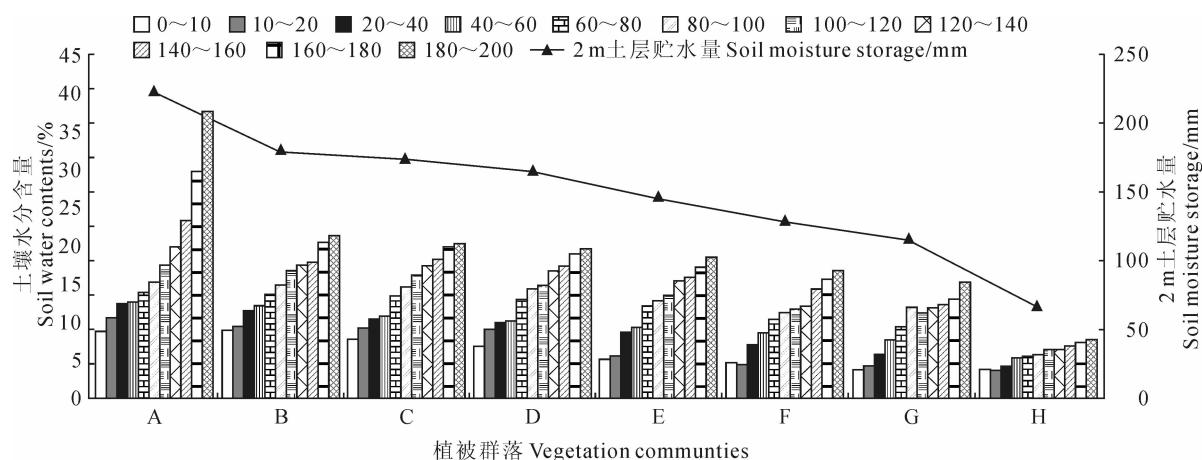


图1 土壤水分含量随海拔梯度变化

Fig. 1 The change of soil water contents at different elevation

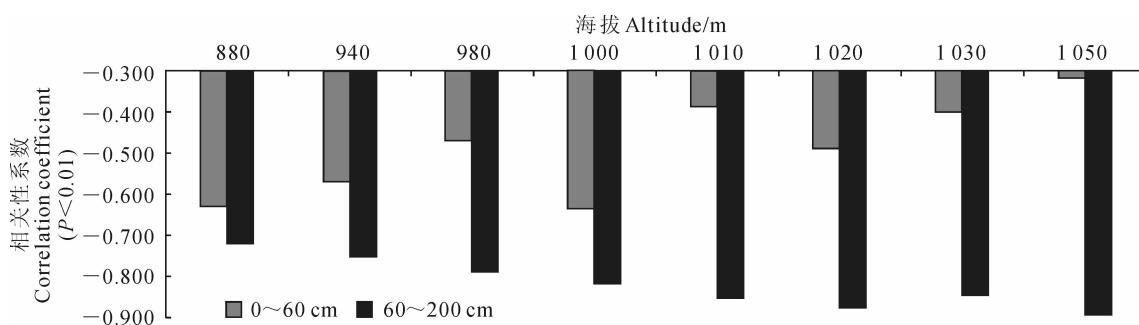


图2 土壤水分含量与海拔间的相关性特征

Fig. 2 The correlation coefficient between altitude and soil water contents

3.2.2 土壤质地 土壤质地影响着土壤水分运移,进而影响着土壤水分异质性程度。表3显示,粘粒和粉粒的变异系数均大于沙粒,且沿着样线,随着海拔增大,沙粒的含量表现出明显递增趋势,而粘粒和粉粒的含量呈现出相反的空间分布特征。土壤质地的空间异质性能够产生水文导度的空间变异,从而导致土壤水分分布的空间异质性^[18]。

由表3可知,粉粒和粘粒均与各层土壤水分含量之间呈正相关关系,且粘粒的相关性大于粉粒的相关性;而沙粒与各层土壤水分含量之间呈负相关关系。因为,土壤粒径粗细程度对土壤质地产生着重大影响,粒径均值越小,土壤可塑性和吸湿性越明显,其透水性较差,持水性越好。土壤质地与浅层(0~60 cm)土壤水分含量的相关性大于深层(60~200 cm)土壤的湿度的相关性,这结论与潘颜霞等^[18]的

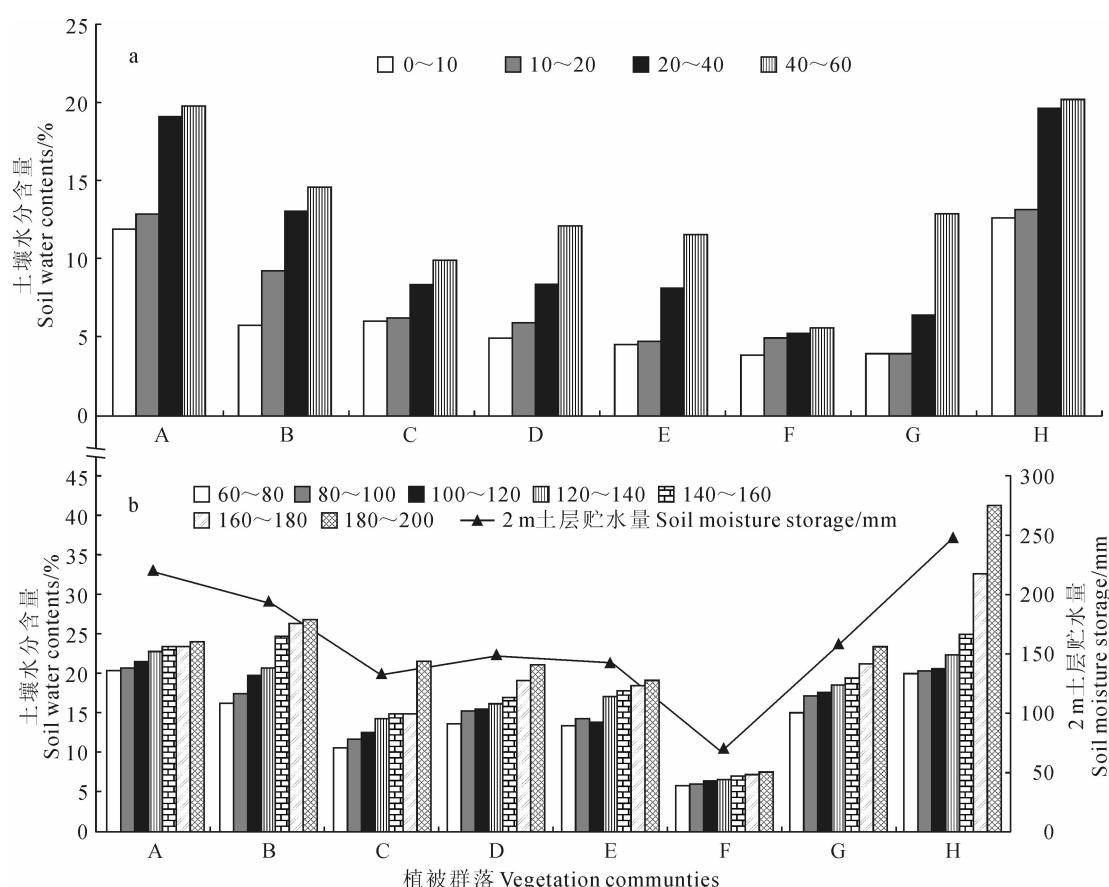
研究结果一致。因为浅层土壤中粉粒级以下的颗粒在风蚀过程中被吹失,呈现出随时间推移变粗的特征,调查结果显示,研究区浅层(0~60 cm)土壤的沙粒含量为65%,而深层(60~200 cm)土壤的粉粒和粘粒含量接近80%。

3.2.3 植被 植被通过遮盖土壤表面影响蒸发率,

通过根活性影响土壤导度并促进土壤表面有机物质表3 土壤粒径与土壤水分含量之间相关性及其空间变异性

Table 3 The correlation coefficient between soil size particle and soil water content and its spatial variability

土壤质地 Soil texture	土壤层 Soil layer/cm		变异系数 CV/%
	0~60	60~200	
沙粒 Sands	-0.3718	-0.2627	14.76
粉粒 Particles	0.3438	0.2567	31.22
粘粒 Clays	0.4867	0.4658	32.27



a. 研究区主要植被浅层土壤水分含量;b. 研究区主要植被深层土壤水分含量及其2 m土层贮水量;

A. 多枝柽柳群落;B. 胀果甘草群落;C. 胡杨群落;D. 疏叶骆驼刺群落;E. 芦苇群落;F. 多枝柽柳沙包群落;G. 苏枸杞群落;H. 芦苇沼泽

图3 研究区主要植被群落土壤含水量特征

a. The shallow soil water contents of main vegetation communities in the study area;b. The soil water contents in deep and 2 m of main vegetation communities in the study area;A. *Tamarix ramosissima* community;B. *Glycyrrhiza inflata*

community;C. *Populus euphratica* community;D. *Alhagi sparsifolia* community;E. *Phragmites australis*

community;F. *Tamarix ramosissima* sand bags community;G. *Lycium ruthenicum* community;H. *Phragmites australis* swamp

Fig. 3 The soil water contents of main vegetation communities in the study area

表 4 植被盖度和根重与土壤水分含量之间相关性

Table 4 The correlation coefficient between vegetation coverage and root weight and soil water content

植被 Vegetation	土壤层 Soil layer/cm	
	0~60	60~200
草本 Herbs	盖度 Cover	0.671 8
	根重 Root weight	-0.543 8
灌木 Shrubs	盖度 Cover	0.426 7
	根重 Root weight	-0.512 0
		-0.663 3

表 5 不同土层土壤水分含量、2 m 土层

贮水量与地下水埋深相关性系数

Table 5 The correlation coefficient of soil water content, soil moisture storage and groundwater depth

项目 Item	土壤层 Soil layer/cm	相关系数 Correlation coefficient
土壤层 Soil layer /cm	0~10	-0.798 4
	10~20	-0.812 73
	20~40	-0.830 85
	40~60	-0.861 1
	60~80	-0.858 1
	80~100	-0.847 6
	100~120	-0.846 5
	120~140	-0.840 9
	140~160	-0.838 7
	160~180	-0.836 3
	180~200	-0.831 7
	2 m 土层贮水量 Soil moisture storage in 2 m/mm	-0.860 0

的增加而影响土壤水分变化,这些因素对于土壤水分含量变化率的影响随着植被种类、密度和盖度变化而变化^[18,30]。图 3 显示,研究区主要植被群落土壤水分含量均相对较低。其中,多枝柽柳沙包群落土壤水分含量最少,均值为 6.681%;芦苇沼泽群落土壤水分含量最大,均值为 23.004%。各主要植被群落浅层(0~60 cm)土壤同一层土壤水分含量差异相对较少(多枝柽柳群落和芦苇沼泽群落;图 3,A),深层(60~200 cm)土壤同一层土壤水分含量差异较大(图 3,B)。不同植被类型及其格局分布影响着土壤水分,植被根系垂直和水平分布格局通过蒸腾耗水影响着其根际层的水分,从而影响到各层土壤水分含量异质性^[9]。草本植物根系较浅,根系生物量集中分布在 40 cm 以上土层中,占全部根系生物量的 85% 以上,对浅层水分影响较大;灌木根系较深,大部分根系分布于 60 cm 以下土层中,占全部根系生物量的 70% 以上,改变了土壤质地和有机质含

量,影响了水文导度,对深层水分影响较大。表 4 显示,植被盖度与土壤水分含量显正相关,且草本植被盖度与浅层土壤水分含量显示较高的关联性,是由于较大的植被盖度可以阻挡太阳照射,减少土壤的蒸发,改善了表层的土壤有机质,往往导致较高的土壤水分;植被根量与土壤水分含量显负相关,且灌木根量与深层土壤水分含量显示较高的关联性,是由于植被根系集中分布层的根系对该层土壤水分含量具有显著的影响,尤其在植被生长旺盛季节,植被蒸腾作用增强,根系吸水强烈,通常导致根系主要分布层的土壤水分含量大幅度降低。

3.2.4 地下水埋深 调查发现地下水埋深较浅的区域,土壤水分含量较高,否则则反之。表 5 显示,土壤含水量与地下水埋深之间存在显著的负相关关系,自上而下其关系逐渐增强;2 m 土层贮水量与地下水埋深的相关性最强,40~60 cm 土壤含水量与地下水埋深的相关性次之,说明研究区土壤水分含量更依赖于地下水,地下水埋深是影响土壤含水量的重要因素。

4 讨 论

敦煌西湖国家级自然保护区,四周均被沙漠、戈壁所隔绝,研究区兼有湿地生态系统和荒漠生态系统,导致本研究所得各变量均为中等变异,存在高度的异质性,具有较强的空间自相关,0~200 cm 土层各层土壤水分含量及 2 m 土层贮水量的变异系数、块金方差、基台值、变程和结构比分别介于 36.51%~88.65%、0.007~0.098、0.112~0.549、116~453 和 76.6%~97.6% 之间。深层(60~200 cm)土壤水分含量的变异较浅层(0~60 cm)土壤水分含量的变异大,且不同层次土壤水分含量的空间异质性差别也较大,空间变异主要发生在较小尺度上。说明深层土壤较高的土壤湿度和较大的变异程度,而浅层土壤水分状况较差且变异程度较小,这是因为表层较底层土壤蒸发强烈,土壤水分含量较低,且与剖面土壤质地不均匀、植被种类、盖度和多度有关,加之研究区主要是以旱生、超旱生植被为主,通过其发达的根系对深层土壤水分的利用较大,进而导致深层土壤水分变异系数大于浅层。

研究区地处极端干旱区,年均降水量不足 40 mm,地下水埋深影响着土壤水分,决定了土壤水分含量的局限性,海拔直接影响地下水埋深情况,进而影响着土壤水分,海拔与深层(60~200 cm)土壤水分含量的相关性大于浅层(0~60 cm)土壤含水量的

相关性,因为深层土壤水分含量主要依赖于地下水位埋深情况,越接近土壤表层,诸如风力和太阳辐射等因子降低了土壤水分对海拔依赖性,因此海拔是影响该区域土壤水分含量空间变异的一个主要环境因子。土壤质地与浅层(0~60 cm)土壤水分含量的相关性大于深层(60~200 cm)土壤水分含量的相关性,与海拔相反。地下水埋深情况决定了土壤水分

含量的局限性,从而决定了植被根系分布的类型和深度,进而决定了植被类型,研究区主要植被群落土壤水分含量均相对较低,草本植被盖度与浅层土壤水分含量显示较高的正关联性,灌木根量与深层土壤水分含量显示较高的负关联性,同时植物在诸多尺度上对土壤水分含量动态方面产生极其重要的反馈作用。

参考文献:

- [1] 毕华兴,李笑吟,刘 鑫,等.晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析[J].北京林业大学学报,2006,28(5):59-66.
- BI H X, LI X Y, LIU X, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture using geological statistics method in the loess region of west Shanxi Province[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(5): 59-66.
- [2] MLLER R E, VEF H J M, FOWLER N L. Spatial heterogeneity in eight central Teaxs grasslands[J]. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 919-928.
- [3] 郭德亮,樊 军,米美霞.黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J].应用生态学报,2013,24(5):1 199-1 208.
- GUO D L, FAN J, MI M X. Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe Oasis, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1 199-1 208.
- [4] ROSSI R E, MULLA D J, JOUREL A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence [J]. *Ecological Monographs*, 1991, 62: 277-314.
- [5] 李朝生,杨晓晖,张克斌,等.沙漠-绿洲系统中降雨、土壤水分与地下水位的响应特征[J].北京林业大学学报,2007,29(4):129-135.
- LI C S, YANG X H, ZHANG K B, et al. Response characteristics of precipitation, soil moisture and groundwater level in desert oasis system[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(4): 129-135.
- [6] 温 从.宁夏盐池沙地主要植物群落土壤水分动态研究[D].北京:北京林业大学,2007:2-12.
- [7] LEGENDER P, FORTIN M J. Spatial pattern and ecological analysis[J]. *Vegetation*, 1989, 80: 107-138.
- [8] 白永飞,许志信,李德新,等.内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J].生态学报,2002,22(8):1 215-1 223.
- BAI Y F, XU Z X, LI D X, et al. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in sipa communities of the Inner Mongolia Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1 215-1 223.
- [9] 马风云,李新荣,张景光,等.沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J].应用生态学报,2006,17(5):789-795.
- MA F Y, LI X R, ZHANG J G, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 789-795.
- [10] 李元寿,王根绪,丁永建,等.青藏高原高寒草甸区土壤水分的空间异质性[J].水科学进展,2008,19(1):61-67.
- LI Y S, WANG G X, DING Y J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in alpine meadow area of the Qinghai Xizang Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 61-67.
- [11] 何志斌,赵文智.荒漠绿洲区人工梭梭林土壤水分空间异质性的定量研究[J].冰川冻土,2004,26(2):207-211.
- HE Z B, ZHAO W Z. The spatial heterogeneity of soil moisture in artificial *Haloxylon ammodendron* [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 207-211.
- [12] 王红梅,王仲良,王 堑,等.华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性[J].生态学报,2013,33(19):6 287-6 294.
- WANG H M, WANG Z L, WANG K, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture across a cropland-grassland mosaic: a case study for agro-pastural transition in north of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6 287-6 294.
- [13] 马全林,鱼 泳,陈 芳,等.干旱区沙漠化逆转过程土壤水分的空间异质性特征[J].干旱区地理,2010,33(5):716-724.
- MA Q L, YU Y, CHEN F, et al. Spatial heterogeneity of soil water content in the reversion process of desertification in arid area[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(5): 716-724.
- [14] 李从娟,雷加强,徐新文,等.古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布[J].生态学报,2014,34(15):4 380-4 389.

- LI C J, LEI J Q, XU X W, et al. Spatial pattern for soil water and chemical properties in Gurbantunggut Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(15): 4 380-4 389.
- [15] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J].应用生态学报,2009,20(1):98-104.
- SONG T Q, PENG W X, ZENG F P, et al. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(1): 98-104.
- [16] 陈文业,张继强,赵明,等.甘肃省敦煌西湖荒漠-湿地植物群落物种多样性特征研究[J].中国沙漠,2012,32(6):1 639-1 646.
- CHEN W Y, ZHANG J Q, ZHAO M, et al. Species diversity characteristics of plant community in Xihu Desert Wetland of Dunhuang, Gansu Province[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, **32**(6): 1 639-1 646.
- [17] 卢琦,李新荣,肖洪浪,等.荒漠生态系统观测方法[M].北京:中国环境科学出版社,2004:12-20.
- [18] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J].生态学报,2009,29(2):993-1 000.
- PAN Y X, WANG X P, SU Y G, et al. Temporal and spatial variability of surface soil moisture in a re-vegetation desert area in Shapotou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **29**(2): 993-1 000.
- [19] 邵方丽.冀北山地典型森林植被与土壤成分的空间异质性关系研究[D].北京:北京林业大学,2012:13-20.
- [20] 颜亮,周广胜,张峰,等.内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析[J].生态学报,2012,32(13):4 017-4 024.
- YAN L, ZHOU G S, ZHANG F, et al. Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(13): 4 017-4 024.
- [21] 王蕙,赵文智,常学向.黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J].生态学报,2007,27(5):1 731-1 739.
- WANG H, ZHAO W Z, CHANG X X. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(5): 1 731-1 739.
- [22] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].生态学报,2006,26(3):647-654.
- LIAN G, GUO X D, FU B J, et al. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(3): 647-654.
- [23] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:18-32.
- [24] 苏松锦.格氏榜天然林土壤空间异质性及其生长适宜性评价[D].福州:福建农林大学,2012:20-31.
- [25] CAMBARDELLA C A, MOOMAN A T, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**: 1 501-1 511.
- [26] 王政权,王成李,哈滨.红松老龄林主要树种的空间异质性特征与比较的定量研究[J].植物生态学报,2000,24(6):718-723.
- WANG Z Q, WANG Q C, LI H B. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6): 945-950.
- [27] 陈鹏,初雨,顾峰雪,等.绿洲—荒漠过渡带景观的植被与土壤特征要素的空间异质性分析[J].应用生态学报,2003,14(6):904-908.
- CHEN P, CHU Y, GU F G, et al. Spatial heterogeneity of vegetation and soil characteristics in oasis-desert ecotone[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(6): 904-908.
- [28] NYBERG L. Spatial variability of water content in the covered catchment at Gardsjön, Sweden [J]. *Hydrological Processes*, 1996, **10**: 89-103.
- [29] KRUMBAEH A W. Effects of microrelief on distribution of soil moisture and bulk density[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1959, **64**: 1 587-1 590.
- [30] FAMIGLIETTI J S, RUDNICKI J W, RODELL M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill Texas[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**: 259-281.

(编辑:潘新社)