

黑河中游荒漠植物生长与降水、土壤水和地下水的关系

牛贇^{1,2,3}, 陈斌⁴, 李秉新^{1,3}, 赵明^{1,3}

(1. 甘肃张掖生态科学研究院 甘肃省祁连山生态科技创新服务平台, 甘肃 张掖 734000;

2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院 红沙窝荒漠化综合防治试验站, 甘肃 张掖 734000; 4. 甘肃省张掖市林业科学研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: [目的] 分析荒漠化防治中植物生长与降水、土壤水和地下水的关系, 为荒漠区植被修复与保护提供科学依据。[方法] 在黑河中游荒漠区建立荒漠化综合防治试验站进行长期定位监测, 取得降水、土壤水、地下水、植物盖度、生物量等数据, 采用特征参数算法、相关分析法和逐步多元回归方法, 对植物生长和水分的年内、年际变化特征及相关回归模型进行分析。[结果] (1) 2006—2014 年, 土壤质量含水率、生物量、盖度变化接近且最大, 降水量次之, 地下水埋深最小; 生物量、盖度呈波动性增大趋势较明显, 降水、土壤水、地下水位变化呈波动性略有降低趋势, 但不明显。(2) 在植物生长季的 3—11 月期间, 土壤各层含水率变化步调基本一致, 植物平均生物量和盖度变化步调基本一致, 降水量和地下水埋深变化步调基本一致。(3) 建立了盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率、生物量与 0—20 cm 土壤质量含水率回归方程, 且均通过了 R 拟合检验, F 方差检验, t 回归系数检验, 通过模型预测盖度、生物量的变差分别为 99.0% 和 91.4%, 预测盖度和生物量变化的准确率分别可达 86.5%, 78.9%。[结论] 黑河中游荒漠植被的生长与环境水分变化关系十分密切, 可通过水资源管理修复植被, 也可根据植被生长状况评估水资源管理工作。

关键词: 生物量; 盖度; 降水量; 土壤质量含水率; 地下水埋深; 黑河中游地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0098-07

中图分类号: Q948.1, X171.1

文献参数: 牛贇, 陈斌, 李秉新, 等. 黑河中游荒漠植物生长与降水、土壤水和地下水的关系[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 98-104. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.018

Relationship Between Desert Plant Growth and Precipitation, Soil Water and Groundwater in Middle Reaches of Heihe River Basin

NIU Yun^{1,2,3}, CHEN Bin⁴, LI Bingxin^{1,3}, ZHAO Ming^{1,3}

(1. *Science and Technology Innovation Service Platform of Ecology in Qilian Mountains, Academy of Ecology Science of Zhangye, Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China;*

2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of*

Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. *Hongshawo Test Station of Desertification Control,*

Academy of Water Resource Conservation Forests of Qilian Mountains in Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China; 4. *Academy of Forestry Science Research of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)*

Abstract: [Objective] Analyzing the relationships between plant growth and precipitation, soil water and groundwater in order to provide the scientific basis for vegetation restoration and protection in desertification control. [Methods] We collected precipitation, soil water, groundwater, vegetation biomass and coverage data based on long-term locating monitoring in the middle reaches of Hehe river basin. The characteristic parameter algorithm, correlation and stepwise multiple regression analysis was used to investigate the response characteristics of natural desert plant growth and inter-annual and annual variation of soil water content. [Results] (1) The change of soil moisture content, biomass and coverage was the greatest, the change of precipitation was secondary, while the change of groundwater depth was minimum. The biomass and cov-

收稿日期: 2015-09-23

修回日期: 2015-10-04

资助项目: 甘肃省科技创新服务平台“甘肃省祁连山生态科技创新服务平台”(144JTCG254); 甘肃省基础研究创新群体“祁连山土壤水源涵养功能与森林分布变化响应关系”; 国家自然科学基金项目“祁连山大野口流域水源涵养功能生态水文关系分析”(41461004)

第一作者: 牛贇(1974—), 男(汉族), 甘肃省通渭县人, 博士, 高级工程师, 在站博士后, 主要从事生态水文学方面的研究。E-mail: niuyun2028@163.com。

通讯作者: 陈斌(1977—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事林业科学研究。E-mail: 601190075@qq.com。

erage showed an obvious increasing fluctuation trend, while the precipitation, soil moisture content and groundwater depth showed a slight decreasing trend. (2) In the growing season from March to November, the annual variation of soil moisture content in each layer were basically the same, and so were the variations of average vegetation coverage and biomass. (3) The regression equations were established to model the relationship between soil moisture content at 0—20 cm depth and vegetation cover and biomass. R fitting test, F test, t test was used. The partial regression coefficient for vegetation coverage and biomass was 99.0% and 91.4%, respectively. The accuracy of predicted changes in vegetation coverage and biomass was 86.5% and 78.9%, respectively. [Conclusion] There is a close relationship between the growth of desert vegetation and changes of environment water in middle reaches of Heihe river. Consequently, desert vegetation can be recovered by water resources management, and water resources management can be assessed according to the vegetation growing condition.

Keywords: biomass; coverage; precipitation; moisture content of soil; groundwater depth; the middle reaches of Heihe river basin

全球干旱半干旱区域面积约占陆地总面积的1/3,近百年来,气候变暖使得中纬度地区的干旱半干旱区范围不断扩大^[1-2]。水分是植物生长的限制因子,如何让水分满足植物的生长,是荒漠化防治工作考虑的一个基本问题^[3]。假如我们掌握了植物生长与水分变化的响应机理,一方面,可合理科学调控水资源,如限制机井数量控制地下水埋深等方式满足植物生长对水分的需要;另一方面,通过植物生长指标评估水资源利用与管理工作的,如在流域上、中、下游地区和各部门水资源比例分配,农业和生态用水比重调控,以及退耕还林、天然林保护、黑河流域综合治理等工程对水资源的影响评估等。

关于植物生长与水分变化关系研究中,有许多通过植物组织含水量、蒸腾速率、水势、渗透势等测定研究植物体内水分对植物形态、生理活动的影响^[4-6],而本文是关于荒漠区植物生长对环境水分(如土壤水)变化的研究,不考虑水分对植物形态、生理等影响,而只关注降水、土壤水、地下水对植物生物量、盖度等方面的影响。关于这方面研究,有些学者研究了地下水位的变化,如赵传燕等^[7]在黑河下游地区研究发现2006年地下水位与黑河分水前的地下水位相比较,地下水位在总体上得到明显升高,但中游地下水在分水后仍有显著下降,平均下降0.96 m。有些学者研究了土壤水对降水的响应,如刘冰等^[8]对黑河流域荒漠区降水特征及其土壤水分对降水脉动响应进行了研究,发现荒漠区土壤水分对降水脉动具有显著的响应现象。这些成果都为干旱区荒漠化防治提供了宝贵的资料^[9-10],但实际工作最需要围绕植物荒漠化实际问题开展研究^[11]。虽然也有一些学者也开展了相关研究,如赵良菊等^[12]对黑河下游河岸林植物水分来源进行了研究,但是,总体显得科技支撑较薄弱。正如赵文智等^[13]研究指出的那样,荒漠化植物防治措施中,要考虑气候、土壤、地下水等环境因素的综合

作用结果。正是这个原因,2006年甘肃省祁连山水源涵养林研究院在黑河流域中游建立“红沙窝荒漠化综合防治试验站”进行长期定位多要素监测。已取得了与土地荒漠化和沙尘暴发生、发展等相关的气象、水文、土壤、植被等9 a连续完整数据。本文提取0—20,20—40,40—60,60—80 cm深土壤质量含水率、地下水埋深、降水量、植物生物量、植物盖度等数据进行分析,以期对荒漠化防治中的水资源管理以及生态工程对水资源影响评估等提供科技支撑和参考依据。

1 研究区概况

黑河流域地处中国西部,全长821 km,跨青海、甘肃和内蒙古3省(区),总面积 1.30×10^4 km²,高山、河流、农田、牧场、荒漠、沙漠等生态类型齐全,还保存着大批珍稀野生动植物资源,是中国及全球物种资源库的一个重要组成部分,也是中国西北干旱地区最大的内陆河流域之一,黑河中游是指黑河出山口莺落峡至正义峡之间的地区。研究区北部分布着巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和塔克拉玛干3大沙漠,风沙线长达1 600 km。范围为北纬 $37^{\circ}28'$ — $39^{\circ}57'$,东经 $97^{\circ}20'$ — $102^{\circ}12'$,平均海拔1 200~1 700 m。属温带干旱大陆性荒漠气候,年均气温 $7.4 \sim 8.5$ °C,年均降水量 $108.3 \sim 150.0$ mm,降水主要集中在6—9月,占全年降水量的70%~80%,年蒸发量 $1 340.7 \sim 2 388.0$ mm。该区人口聚集,人类活动对自然生态系统的干扰最为剧烈,土地受人为活动影响也最显著。其天然植被稀疏,主要有白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)、木本猪毛菜(*Salsola arbuscula*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)等荒漠植物,地带性土壤为灰漠土、灰钙土和灰棕漠土;非地带性土壤有风沙土、草甸土、沼泽土、盐渍土和灌淤土等。总的特点是土壤贫瘠、有机质缺乏、质地较粗、含盐量高,属荒漠土类,生态地域复杂,具有

平原荒漠植被的特征,在植被地理规律和地理时空分布上分异明显,有古老和现代特征。地貌景观类型有流动,半流动,固定、半固定沙丘以及丘间低地。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及监测方法

红沙窝荒漠化综合防治试验站位于甘肃省张掖市中心以北 15 km 处的甘州区龙渠乡龙首滩,海拔 1 450 m,地理坐标为 39°01'46"N,100°31'56"E,各试验点位置如表 1 所示,降水量数据来自气象站,设置为每昼夜 0—23 整点监测 1 次数据;地下水埋深数据来自 1 和 2 号井,每月 15 号调查 1 次,且取 2 号井的平均值;土壤质量含水量数据来自荒漠区 1—5 号样地周边随机选取 3 个有代表性的样地挖剖面取土样,每月 15 号调查 1 次;植物平均生物量和盖度数据来源于荒漠区 1—5 号,大小为 20 cm×20 cm 的固定样地(表 1),每月 15 号调查 1 次。本文提取 2006—2014 年相关调查数据进行研究。

表 1 黑河流域中游红沙窝荒漠化综合试验点位置

样地名称	纬度	经度	海拔/m
气象站(Y ₁)	39°01'59"N	100°31'52"E	1 441
1 号井(Y ₂)	39°01'49"N	100°31'58"E	1 450
2 号井(Y ₃)	39°01'42"N	100°32'20"E	1 447
龙首滩 1 号样地(Y ₄)	38°47'47"N	100°16'19"E	1 701
龙首滩 2 号样地(Y ₅)	38°47'47"N	100°16'20"E	1 703
龙首滩 3 号样地(Y ₆)	38°47'45"N	100°16'21"E	1 703
龙首滩 4 号样地(Y ₇)	38°47'46"N	100°30'22"E	1 702
龙首滩 5 号样地(Y ₈)	38°47'47"N	100°30'22"E	1 703

(1) 土壤质量含水率数据^[14]。土壤质量含水率数据采用大环刀在试验站固定样地上定期取样,取样深度 80 cm,分 4 个层次,各层范围分别为 0—20, 20—40,40—60,60—80 cm,每层取样重复 3 次。采回的土样在实验室中采用烘干法(105 ℃)测定其质量含水率:

$$S_w = (m_2 - m) / 100 m \quad (1)$$

式中: S_w ——土壤质量含水率(%); m_2 ——湿土质量(g); m ——烘干土质量(g)。

在各样地内采用多剖面重复测定,从 3 月植物生长开始,每月 15 日采样(期间若发生降水事件,观测时间则推迟到降水后 1 h,若全天降水则次日取样),到 11 月植物生长停止。

(2) 植物平均生物量和盖度数据^[15]。由于研究区荒漠化植被较稀疏,主要是白刺、红砂、木本猪毛菜、泡泡刺等,因此,测定样方内每株植物覆盖总面积

与样方面积之比求得植物平均盖度;生物量测定选择传统的收割法,也就是选择与固定样地植被最相似、大小相同的 3 块随机样地,将样方地上部分的植被全部收割,然后带回实验室称取其鲜重和干重,植被干重与样方面积比求得植被平均生物量。

2.2 分析方法

2.2.1 特征值参数算法 用以下公式分别计算 0—20,20—40,40—60,60—80 cm 深土壤质量含水率、地下水埋深、降水量、植物平均生物量、植物平均盖度年内、年际变化平均值(μ)、标准差(σ)、变异系数(C_v)。

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (4)$$

式中: x_i ——各因子统计参数, N 为样本数。

2.2.2 相关分析法 整编红沙窝荒漠化综合防治试验站 2006—2014 年数据,建立月份和年际尺度上的降水量(P ,mm)、土壤质量含水率(S_w ,%)、地下水埋深(D ,cm)、平均生物量(B ,g/m²)、平均盖度(C ,%)数据表。利用以下公式求得相关系数 r 。

$$r = \frac{\sum (x - \mu_x)(y - \mu_y)}{n \times \sigma_x \times \sigma_y} \quad (5)$$

式中: r ——相关系数; μ_x , μ_y ——平均值; σ_x , σ_y ——标准差; n ——数据对数。

2.2.3 逐步多元线性回归分析法 通过植物生长和水分系数拟合计算、方差分析、回归模型优度 R 检验、 F 检验、 t 检验等,最后建立植物盖度和生物量回归模型。

3 结果与分析

3.1 植物生长和水分年际变化特征分析

根据平均值(μ)、标准差(σ)、变异系数(C_v)统计分析,2006—2014 年生长季节的 3—11 月,研究区 0—20,20—40,40—60,60—80 cm 土壤质量含水率、植物平均生物量、盖度、地下水埋深、降水量年均值、标准差、变异系数、波动范围上下限如表 2 所示。由于各层次土壤水分在垂直空间变化上不明显,所以可以将土壤各层质量含水率的平均值、标准差、变异系数及波动范围再次求得各平均值为 6.51%,2.08%,0.32,4.44%~8.59%。从表 2 可知,土壤质量含水率、生物量、盖度变异系数很接近,且都较大,降水量次之,地下水埋深最小。

表2 黑河中游龙首滩荒漠植物生长和水分年际变化特征

年际变化特征参数值	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 C_v	波动下限	波动上限
降水量/mm	139.61	35.28	0.25	104.33	174.89
0—20 cm 土壤质量含水率/%	6.45	2.38	0.37	4.07	8.83
20—40 cm 土壤质量含水率/%	6.75	2.12	0.31	4.63	8.87
40—60 cm 土壤质量含水率/%	6.42	2.08	0.32	4.34	8.50
60—80 cm 土壤质量含水率/%	6.43	1.74	0.27	4.69	8.17
地下水埋深/cm	306.86	22.29	0.07	284.57	329.15
平均盖度/%	18.70	6.19	0.33	12.52	24.89
平均生物量/(g·m ⁻²)	109.87	34.40	0.31	75.47	144.27

从图1可以看出,生物量、盖度呈波动性增大趋势较明显,降水、土壤水、地下水位(地下水埋深与水位相反)变化呈波动性略有降低趋势,但不明显。说明植物的生长不仅与水分密切相关,还与外界干扰关系紧密,近几年退耕还林和生态保护工程力度加大,减少了人为对荒漠植物生长的干扰,虽然水分没增加,但是植被的生长和覆盖度是增长的。

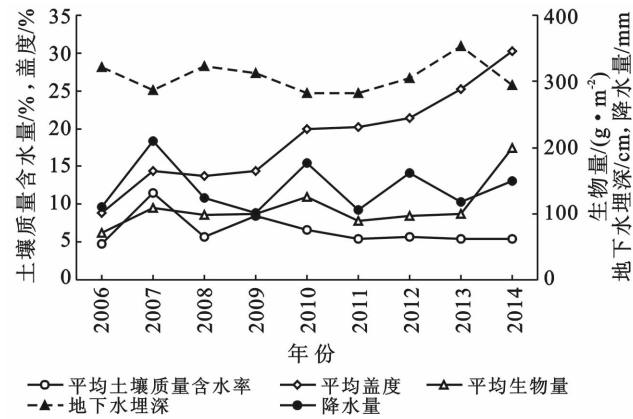


图1 黑河中游龙首滩荒漠植物生长和水分年际变化特征

3.2 植物生长和水分年内变化特征分析

如图2所示,在一年植物生长季的3—11月,降水量、地下水埋深变化步调基本一致,3月降水量为4.14 mm,地下水埋深为83.56 cm,随后均逐渐增大,直

到7月降水量为36.10 mm,地下水埋深为578.11 cm,均达到最大值,然后又逐渐降低,进入10月,地下水埋深为191.89 cm,11月份又升为300.20 cm,而降水量继续降低至11月的0.70 mm。土壤各层含水率变化步调基本一致,3月各层土壤质量含水率平均值为5.67%,随着逐渐升高,直到11月份达到最大值为7.96%。

从表3可见,土壤水分垂直变化较小。生物量和盖度变化步调基本一致,3月盖度为15.59%,生物量为51.03 g/cm²,随后均逐渐增大,直到9月份盖度为23.26%,达到最大值,然后又减小,直到11月减至16.43%;而生物量9月为121.52 g/cm²,继续逐渐增加,直到11月达到最大为187.37 g/cm²。

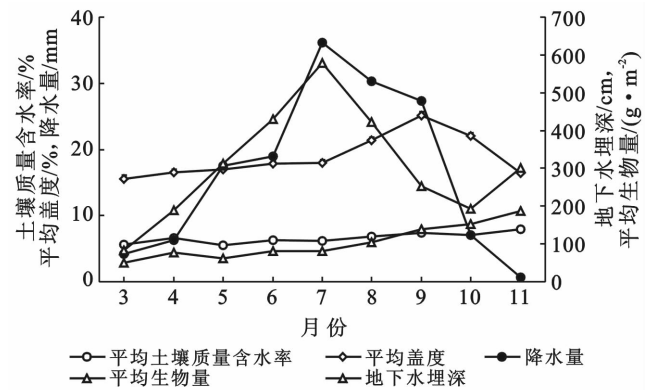


图2 黑河中游龙首滩荒漠植物生长和水分年内变化特征

表3 黑河中游龙首滩荒漠植物生长和水分年内变化特征

年内变化特征参数值	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 C_v	波动下限	波动上限
降水量/mm	16.50	11.99	0.73	28.5	4.5
0—20 cm 土壤质量含水率/%	6.45	0.94	0.15	7.4	5.5
20—40 cm 土壤质量含水率/%	6.88	0.94	0.14	7.8	5.9
40—60 cm 土壤质量含水率/%	6.64	1.14	0.17	7.8	5.5
60—80 cm 土壤质量含水率/%	6.39	0.80	0.13	7.2	5.6
地下水埋深/cm	306.86	142.29	0.46	449.2	164.6
平均盖度/%	18.86	3.05	0.16	21.9	15.8
平均生物量/(g·m ⁻²)	150.69	100.30	0.67	251.0	50.4

表 3 各层土壤质量含水率变异系数平均为 0.14, 结合图 2 可以看出, 年内变化幅度(变异系数)从大到小依次为: 降水量 > 生物量 > 地下水埋深 > 平均盖度 > 土壤质量含水率。

3.3 植物生长和水分相关性分析

在月份尺度上进行相关性分析, $\alpha=0.05$ ($p<0.05$) 水平上查得临界值 $F_{0.05}(1,9)$ 为 5.117, 代入相关系数临界值 $r_{0.05} = \sqrt{F_{0.05}(1,9)/[F_{0.05}(1,9)+9]}$, 求得 $r_{0.05}$ 为 0.602, 相关系数大于临界值为相关显著, 小于则为相关不显著。

如表 4 所示, 盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率显著相关, 与其他因子相关不显著; 生物量与 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤质量含水率显著相关, 与其它因子相关不显著。同理, 在年际尺度上进行相关性分析, 求得相关系数临界值 $r_{0.05}$ 为 0.666, 盖度与生物量显著相关, 与其他因子相关不显著; 生物量除与盖度显著相关外, 与其他因子相关不显著。通过相关性分析, 黑河中游植物生长与土壤水分月相关较显著, 但由于降水量极小, 蒸发量极大, 降水在月份尺度上或年尺度上对植物生长影响不显著, 又由于荒漠干旱区植物利用水分的方式有两种: 一是利用深根吸收地

下水或深层土壤水, 二是利用发达的浅层水平根系吸收各层土壤水^[16]。此外, 还有的植物具有二态性根系, 能够更灵活地适应干旱区环境^[17]。本研究区植物主要为荒漠地区超旱生小灌木, 根系较短, 地下水埋深对其影响较小, 表现出植物生长与地下水埋深在月或年尺度上均关系极弱的现象。利用植物生长与水分关系分析结果, 可解释干旱荒漠区植物生长的自然现象, 从雨季的每月看, 有所生长, 但从每年总体看, 其生长并不显著。综上, 可初步筛选月平均盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率, 月均生物量与 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤质量含水率进行回归分析。

3.4 回归模型分析

3.4.1 回归模型拟合及方差分析 根据表 4 可知, 由于月盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率, 月生物量与 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤含水量呈显著相关, 因此, 将土壤质量含水率作为因变量进行线性逐步回归分析, 可得盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率、生物量与 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤质量含水率回归模型均通过 R 拟合检验、 F 方差检验、 t 回归系数检验, 结果如表 5—6 所示。

表 4 黑河中游龙首滩荒漠植物月生长和水分相关系数及显著性分析

相关因子	降水量	土壤质量含水率				地下水埋深	平均盖度	平均生物量
		0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm			
降水量	1.000							
	0—20 cm	0.285	1.000					
土壤质量	20—40 cm	-0.197	0.689*	1.000				
含水率	40—60 cm	-0.362	0.622*	0.815*	1.000			
	60—80 cm	-0.213	0.379	0.237	0.139	1.000		
地下水埋深	0.768*	0.151	0.003	-0.027	-0.299	1.000		
平均盖度	0.464	0.783*	0.208	0.144	0.331	0.055	1.000	
平均生物量	-0.220	0.776*	0.867*	0.891*	0.340	-0.047	0.449	1.000

注: * 表示相关性显著; 未标注者为相关性不显著。

表 5 黑河中游龙首滩荒漠植物生长与水分拟合参数

自变量	因变量	复相关系数 R	复测定系数 R^2	调整后复测定系数 \bar{R}^2	标准误差	F 检验值	显著水平
0—20 cm	盖度	0.995	0.990	0.865	2.044	778.274	$p<0.001$
土壤质量	0—20 cm	0.956	0.914	0.789	34.990	84.910	$p<0.001$
含水率	20—40 cm	0.867	0.752	0.717	24.485	21.246	$p<0.01$
	40—60 cm	0.891	0.794	0.765	22.321	26.989	$p<0.01$

盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率、生物量与 0—20, 20—40, 40—60 cm 土壤质量含水率回归拟合及方差分析的 F 检验值及显著水平如表 5 所示, 根据复相关系数判读标准, 一般地, 复相关系数 $|R|>0.95$, 存

在显著性相关; $0.95 \leq |R| \leq 0.8$ 高度相关; $0.5 \leq |R| < 0.8$ 中度相关; $0.3 \leq |R| < 0.5$ 低度相关; $|R| < 0.3$ 关系极弱, 认为不相关。盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率、生物量与 0—20 cm 土壤质量含水率属于显

著性相关,说明模型拟合效果均较理想。虽然生物量与 20—40,40—60 cm 土壤质量含水率属于高度相关,但 0—20 与 20—40,40—60 cm 土壤质量含水率属显著相关(如表 4),又由于 0—20 cm 土壤质量含水率与生物量显著水平最高,因此,仅取 0—20 cm 土壤质量含水率与生物量建立回归模型。

复测定系数表明自变量可解释因变量变差的权重,0—20 cm 土壤质量含水率可解释盖度变差的 99.0%。0—20 cm 土壤质量含水率分别可解释生物量变差的 91.4%。调整后复测定系数表明自变量可解释因变量变化的权重,0—20 cm 土壤质量含水率可解释盖度变化的 86.5%。0—20 cm 土壤质量含水率可解释生物量变化的 78.9%,剩余部分需由其他因素来解释,如陆面的微地形变化等因子。标准误差

说明预测值与实测值之间的平均误差,此值越小,说明拟合程度越理想。表 5 中 F 值是方差分析检验值,是回归均方差与剩余均方差的比值,由于我们期望回归均方差越大越理想,剩余均方差越小越理想,所以, F 值越大,说明模型预测结果越理想。一般地,我们期望 F 显著水平 $\alpha \leq 0.05$ 。从表 5 可以看出, F 显著水平均小于 0.05,因此,在 $\alpha = 0.05 (p < 0.05)$ 水平上查得 $F_{0.05}(1, 8)$, $F_{0.05}(1, 7)$ 的临界值 F_a 分别为 5.591, 5.318, F 检验值远远大于临界值 F_a ,初步确定利用土壤质量含水率建立的模型能较理想地预测盖度和生物量变化。

3.4.2 回归系数分析 回归系数分析主要是检验相关系数的显著程度,表 6 中 p 值表示回归系数的显著程度, p 值越小,回归系数变化越显著。

表 6 黑河中游龙首滩荒漠植物盖度、生物量与水分回归系数显性分析

因变量	自变量	回归系数	标准误差	模型检验值(t)	显著度(p)	下限 95%	上限 95%
盖度	0—20 cm 土壤质量含水率/%	2.918	0.105	27.898	0.000 000 003	2.677	3.159
生物量	0—20 cm 土壤质量含水率/%	16.496	1.790	9.215	0.000 02	12.368	20.625

采用逐步回归分析方法,如表 6 中 p 值均小于 0.05,因此, $\alpha = 0.05$ 水平上,查得 $t_{0.05(9)}$, $t_{0.05(8)}$ 的临界值分别为 2.262, 2.306,从表 6 可看出,其相对应的 t 检验值的绝对值均大于临界值,这说明常数、土壤质量含水率在 $\alpha = 0.05 (p < 0.05)$ 水平上极显著,且置信度为 95%。

综合上述 R 拟合检验、 F 方差检验、 t 回归系数检验,可得出生物量回归模型为:

$$C = 2.918S_{w10} \quad (R^2 = 0.99, p < 0.05) \quad (6)$$

$$B = 16.496S_{w10} \quad (R^2 = 0.914, p < 0.05) \quad (7)$$

式中: S_{w10} ——0—20 cm 土壤质量含水率(%); B , C ——平均生物量(g/m^2)和平均盖度(%).

4 结论

(1) 2006—2014 年际变化上,土壤质量含水率、生物量、盖度变化较接近且最大,降水量次之,地下水埋深最小。生物量、盖度呈波动性增大趋势较明显,降水、土壤水、地下水水位变化呈波动性略有降低趋势,但不明显。

(2) 在一年的植物生长季的 3—11 月,土壤各层含水率变化步调基本一致,植物平均生物量和盖度变化步调基本一致,降水量和地下水埋深变化步调基本一致。变化幅度从大到小依次为:降水量 > 生物量 > 地下水埋深 > 平均盖度 > 土壤质量含水率。

(3) 盖度与 0—20 cm 土壤质量含水率、生物量与 0—20 cm 土壤质量含水率回归模型为 $C = 2.918$

$S_{w10} (R^2 = 0.99, p < 0.05)$, $B = 16.496S_{w10} (R^2 = 0.914, p < 0.05)$,通过模型可预测盖度、生物量变差分别为 99.0% 和 91.4%,预测盖度和生物量变化的准确率分别可达 86.5%, 78.9%。

黑河流域土地荒漠化面积占 54.90%~64.30%^[18],土地荒漠化防治其中一项重要措施是调控土壤水能够维持荒漠植物的正常生命。利用本研究回归模型原理,通过对土壤含水量指标评估,确定植物生长对水分的最低要求阈值指标;另外,在分配流域上、中、下游地区和各部门水资源比例,安排农业和生态用水比重,以及退耕还林、天然林保护、黑河流域综合治理等工程对水资源的影响等方面充分考虑荒漠植物生长与水分需要是否满足最低需求。河川径流是干旱区内陆河流域的主要水资源。流域内往往存在上、中、下游地区和各部门实行公平合理的水资源分配问题。例如黑河流域,国家计委和水利部先后于 1992 和 1997 年批准了黑河分水方案。流域上游常常建有水力发电站,人工调控向中下游供水。在这些水资源调控和管理中,本文研究的植物生长和水分年内年际变化规律以及植物生物量回归模型都可提供科技支撑和参考数据。

[参 考 文 献]

- [1] Dai Aiguo. Drought under global warming: A review. [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.

- [2] Seneviratne S, Pal J, Eltahir E, et al. Summer dryness in a warmer climate: A process study with a regional climate model[J]. *Climate Dynamics*, 2002, 20(1): 69-85.
- [3] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 等. 民勤荒漠区几种主要固沙植物群落的水分平衡特性[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 139-144.
- [4] 奚如春, 马履一, 王瑞辉, 等. 林木耗水调控机理研究进展[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(6): 692-697.
- [5] 白登忠, 邓西平, 黄明丽. 水分在植物体内的传输与调控[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1637-1643.
- [6] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [7] 赵传燕, 李守波, 冯兆东, 等. 黑河下游地下水波动带地下水水位动态变化研究[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(2): 365-369.
- [8] 刘冰, 赵文智, 常学向, 等. 黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 3716-722.
- [9] 唐志红, 纪永福, 安富博, 等. 10 a 来民勤县荒漠草地植物群落变化与降雨量的关系[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 47-53.
- [10] 安桂香, 曾凡江, 孙旭伟, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘不同植被区土壤水分状况研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(1): 63-67.
- [11] 闫峰, 吴波. 近 40 a 毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(6): 987-996.
- [12] 赵良菊, 肖洪浪, 程国栋, 等. 黑河下游河岸林植物水分来源初步研究[J]. *地球学报*, 2008, 29(6): 709-718.
- [13] 赵文智, 刘鹤. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [14] 牛赞, 刘贤德, 王立, 等. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 385-391.
- [15] 崔清涛, 阅丽梅, 刘清泉. 荒漠草原灌木与草本植物年度生物量测定分析[J]. *内蒙古林业科技*, 1994, 11(3): 30-33.
- [16] Dawson T E, Pate J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: A stable isotope investigation[J]. *Oncology*, 1996, 107(1): 13-20.
- [17] 张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 110-113.
- [18] 王金叶, 马永俊, 江泽平. 甘肃省张掖市土地荒漠化发展动态及成因探析[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 368-374.

(上接第 97 页)

- [2] Xie Fazhi, Liu Guijian, Wu Fengchang, et al. Selective adsorption and separation of trace dissolved Fe(III) from natural water samples by double template imprinted sorbent with chelating diamines[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 183(15): 372-380.
- [3] 叶春, 金相灿, 王临清, 等. 洱海湖滨带生态修复设计原则与工程模式[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 717-721.
- [4] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 1952-1959.
- [5] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 等. 云南洱海的生态保护及可持续利用对策[J]. *环境科学*, 2005, 26(5): 38-42.
- [6] 徐斌. 苍山十八溪入湖河口水样氮形态空间分布规律[D]. 云南 玉溪: 玉溪师范学院, 2014.
- [7] 焦立新, 赵海超, 王圣瑞, 等. 2010 年洱海全湖磷负荷时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 534-539.
- [8] Anshumali, A L, Ramanathan. Phosphorus fractionation in surficial sediments of Pandoh Lake, Lesser Himalaya, Himachal Pradesh, India [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(9): 1860-1871.
- [9] 王正能. 苍山十八溪入湖河口沉积物氮形态空间分布特征[D]. 云南 玉溪: 玉溪师范学院, 2014.
- [10] 倪喜云, 杨苏树, 欧阳作富, 等. 洱海湖滨带现状浅析[J]. *农业环境与发展*, 2002, 19(2): 29-30.
- [11] 叶春, 金相灿, 王临清, 等. 洱海湖滨带生态修复设计原则与工程模式[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 717-721.
- [12] Ruban V. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370(2/3): 224-228.
- [13] 何桐, 谢健, 余汉生, 等. 大亚湾表层沉积物中磷的形态分布特征[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49(6): 126-131.
- [14] Lena B M, Gilles P, Charles R, et al. Structure and function of buffer strips from a water quality perspective in agriculture landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 31(1/2/3): 323-331.