

陕西省南秦岭典型土质滑坡形成机制及风险评价

——以商洛市山阳中学滑坡为例

高波^{1,2}, 张茂省^{1,2}, 贾俊^{1,2}, 张成航^{1,2}

(1. 国土资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 对陕西省南秦岭典型土质滑坡形成机制及风险进行研究和评价, 为该区地质灾害的防治提供支持。[方法] 以陕西省商洛市山阳县山阳中学滑坡为研究对象, 通过现场调查、勘察及室内试验开展研究。[结果] 山阳中学滑坡现处于基本稳定状态, 但不排除遭遇极端气候下复活的可能, 滑坡复活概率为 7.45%。[结论] 区域地壳差异性运动是山阳中学滑坡形成的内动力因素; 降雨是该滑坡启动的主要外在诱因; 滑坡威胁范围内人员在最大风险中丧命的年概率为: 1.70×10^{-3} 。

关键词: 山阳中学; 滑坡; 形成机制; 风险分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0097-05

中图分类号: P642

文献参数: 高波, 张茂省, 贾俊, 等. 陕西省南秦岭典型土质滑坡形成机制及风险评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 097-101. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20160912.001

Risk Assessment and Formation Mechanism for Typical Soil Landslide in South Qinling Mountains of Shaanxi Province

—Taking Shanyang School Landslide as an Example

GAO Bo^{1,2}, ZHANG Maosheng^{1,2}, JIA Jun^{1,2}, ZHANG Chenghang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] Studying on the formation mechanism and risk assessment of typical soil landslide in South Qinling Mountains can provide technical support for the prevention of geological disasters in the region. [Methods] The Shanyang School landslide in Shaanxi was selected as an example, the formation conditions and distribution characteristics were analyzed through in situ investigation, survey and laboratory test. [Results] The results show that Shanyang School landslide is in a stable state, the landslide may be revive suffered extreme climates, and resurrection probability is 7.45%. [Conclusion] Regional differences in the crustal movement are the inner dynamic factor of the landslide, and rainfall is the main induced factor of landslide. The maximum personnel risk probability is 1.70×10^{-3} in the threats range.

Keywords: Shanyang school; landslide; formation mechanism; risk assessment

陕西省南秦岭是我国地质灾害的重灾区之一, 历年来滑坡灾害严重^[1-3], 其中山间断凹盆地内由地壳差异性运动及岩体风化等原因形成的土质滑坡分布广泛, 人民群众生命财产安全受到严重威胁。为此, 开展该区域内土质滑坡的形成机制及风险评价研究可为此类滑坡灾害防治及风险减缓提供依据。山阳

中学滑坡位于陕西省山阳盆地北侧, 山阳县城关镇山阳中学后, 为典型土质滑坡。20 世纪 80 年代遭受多次连续强降雨, 加之坡体前缘砖厂开挖取土导致滑坡局部发生滑移。近两年每逢雨季滑坡体均有不同程度的变形, 给滑体周围居民生产和生活带来危害, 严重威胁滑坡前缘山阳中学本部教学楼及在校师生的

收稿日期: 2016-07-04

修回日期: 2016-10-11

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“陕西省重要城镇地质灾害调查”(12120113008900); 中国地质调查局地质调查项目“秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查”(12120111000150022)

第一作者: 高波(1981—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害调查防治风险评估等方面的研究。E-mail: 43617102@qq.com。

生命财产安全。本文通过现场调查、钻探及室内试验,查明了山阳中学滑坡岩土体结构特征及物理力学性质,在分析滑坡形成条件和发育特征基础上,结合滑坡区域地质演化背景及降雨资料,研究了该滑坡形成机制,并初步分析了山阳中学滑坡的风险性。

1 滑坡区地质环境概况

山阳中学滑坡属南秦岭东西向流岭山脉南侧低山斜坡及县河阶地地貌,属山阳断凹盆地北缘。物质组成以黏土为主,局部为山间坡积物、残积物及河谷冲积物。滑坡区南侧为 EW 向山阳深断裂,陡倾 N,为一多期活动的逆断层。北侧为 NW 向商南深断裂,陡倾 NE,为逆断层。南北两条断裂构造之间即为秦岭褶皱系礼县—柞水华力西褶皱带。滑坡就处于该褶皱带上,属山阳断凹盆地。盆地内有厚度较大的白垩系红色碎屑岩沉积。受构造作用影响白垩系岩层产状与地形斜坡同向南倾,构成不稳定斜坡。第四纪以来,区域内间歇性脉动上升,不利于山体稳定^[4]。据《中国地震烈度区划图》,滑坡区属远震区,基本烈度为 VI。整个山阳县境内未发生过破坏性地震。自明代以来,研究区内共发生 <5 级的小震及微震 19 次。据《陕西省一般建设工程地震动参数表》,滑坡区地震峰值加速度微 0.05 g。滑坡区地层岩性主要有白垩系碎屑岩和第四系碎石土和黏土。两者不整合接触。白垩系分布于滑坡区北部低山斜坡区。岩性主要红褐色砾岩、砂砾岩为主,钙质胶结,胶结程度较高,较坚硬。该套地层厚度较厚,大于 200 m。第四系不整合于白垩系砾岩、砂砾岩之上,以粉质黏土、黏土为主,局部夹砂砾石薄层。厚度约为 5~15 m。

2 山阳中学滑坡发育特征

2.1 滑坡形态特征

山阳中学滑坡位于山阳县城关镇山阳中学北侧,地处县河(丰阳河)北侧三级阶地上。滑坡后缘高程 754 m,前缘高程 718 m,高差 36 m,斜坡总体坡形为凹形,上陡下缓,坡度 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$,坡向 186° ,坡面中部下凹两侧高,为土质斜坡,坡体上覆黄褐色、褐红色第四系粉质黏土、含砂砾黏性土,下伏基岩为第三系砖红色砂砾岩,产状 $210^{\circ}\angle 25^{\circ}$ 。坡面植被较差,为荒草地(图 1)

滑坡体长约 150 m,宽约 200 m,厚约 5 m,面积

$3\times 10^4\text{m}^2$,体积 $1.5\times 10^5\text{m}^3$,滑向 186° ,平面形态为矩形,剖面为凹形,属于中型粘性土滑坡,滑坡体为第四系冲洪积粉质黏土、含砂砾黏土,主滑面为上部堆积层与基岩接触面,次级滑面为层内土体分界面和剪切破坏面,目前滑动变形主要位于上部浅层滑面上,滑坡体上主要建筑为砖厂,前缘即为山阳中学教学楼,公寓楼(图 2)。

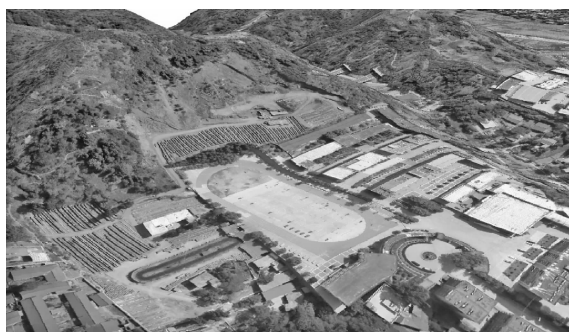


图 1 山阳中学三维地形地貌和滑坡全貌图



图 2 山阳中学滑坡中部平台开挖出露次级滑带

2.2 滑坡变形特征

根据调查访问,滑坡体初次滑动时间为 1971 年山阳中学建校后;1984 年 7 月连阴雨、暴雨后,在滑坡后缘形成 3 条弧形拉张裂缝,主裂缝长 120 m,宽 0.6~0.8 m,错坎高 1~1.5 m,滑动距离 2~3 m,损坏校舍 6 间;1987,1988 年雨季,坡体西侧下滑明显,附近水塔变形漏水。目前由于砖厂下部切坡挖方,坡体产生多级横向陡坎,高 0.5~1 m,可见滑痕,滑体

中部下滑明显,形成洼地,土体较湿,含水量高。滑体上部树木歪斜,坟墓变形。现今,由于砖厂取土烧砖,坡体左侧出现数条长大拉张裂缝,裂缝上宽下窄,最大宽度 15 cm(图 3)。



图 3 山阳中学滑坡左翼长大拉张裂缝

2.3 滑面及滑带土特征

根据现场工程地质钻探、随钻监测结果分析可知,该滑坡为浅层土质滑坡,钻探揭露该滑坡滑带出露深度约 5~7 m(图 4)。滑面为红色黏土,滑面以上红色黏土,潮湿,硬塑状态,裂隙发育;滑面以下红色黏土,结构致密,硬塑状态,可见擦痕。滑带土岩性为黏土,黄褐色,可塑—软塑状态,搓条而不断裂,土质细腻均匀,厚度 1~5 cm。



图 4 山阳中学 ZK2 钻孔岩芯编录

随钻监测数据亦能验证上述判断,如图 5 所示,为随钻监测 ZK₁, ZK₃, ZK₄, ZK₅, 钻头钻入全过程(剔除提钻及其它非钻进时间),表征钻头在地层中的深度随时间的变化,其中纵坐标为钻进深度(m),横坐标为钻进时间(min)。图 5 中曲线的梯度表示钻头在此孔中的钻入速度。通过分析曲线,钻头钻速的变化,表征地层钻进的难易程度,曲线斜率变化处表征地层岩性变化,通过如下 4 个钻孔的曲线分析,可知,山阳中学滑坡软弱带(滑带)深度分布在 5~7 m 处。与钻孔岩芯编录实际情况基本吻合。

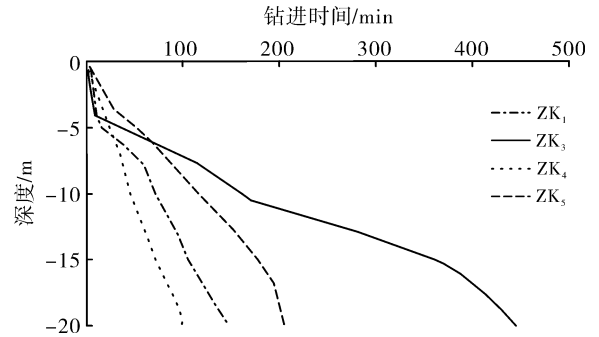


图 5 山阳中学滑坡随钻监测全过程曲线

3 滑坡成因分析

3.1 滑坡形成的地形地貌条件

山阳中学所在城关镇南北侧均有深断裂通过,南侧 2 km 为东西向山阳深断裂,北倾,倾角 60~80°,为一多期活动的逆断层。北侧则有 NW-SW 向商南深断裂,倾向 NE,倾向 NE,倾角 60°~80°,为逆断层。2 条断裂多次活动,造成地形高差增大。第四纪以来,该区间歇性脉冲上升,时而河流下切侵蚀,造成陡岸,岸边地层失水,时而又形成河流堆积^[4]。总的趋势是河流下切幅度大,两岸形成向河倾斜的阶梯状抬升地形,尤其县河 3 级阶地,其阶面向南倾斜坡度很大,约 15°~25°。这种地形为滑坡的形成提供了有利的地形地貌条件。

3.2 滑坡物质来源与结构成因

山阳中学所在三级阶地上部为粘性土,透水能力差,具有膨胀性,浸水后膨胀,失水后产生许多干缩裂缝及微细裂隙,为雨水下渗准备了通道。据野外观察,土体涨缩裂缝集中发育深度 2~5 m,集中降雨时,雨水沿裂缝下渗至 2~5 m,因下部黏土已无涨缩裂缝,水分无法继续下渗,聚集在 2~5 m 范围内,由于水的润滑和软化作用,在此形成软弱带,在其他因素配合下,上部土体沿此软弱带下滑。

3.3 滑坡诱发因素分析

山阳中学 1972 年在滑坡前缘开挖坡脚,修建学生宿舍,是滑坡前缘临空,为滑坡形成创造了有利的空间条件。当地居民利用滑坡后部弧形后壁和后缘开挖墓穴,增加了降雨入渗的机会。

滑坡区属多雨湿润气候,雨水沿干缩裂缝下渗,一则增大了土体容重,加大坡体的势能,二则雨水下渗改变土体塑形状态,形成软弱带,降低土体的摩擦力和黏聚力,最终失稳下滑。山阳中学滑坡 1984 年及以后几年雨季所出现的变形破坏迹象,即因此形成。

综上所述,山阳中学滑坡的形成是多因素综合作用的结果。滑坡体上覆第四系黏性土与下伏白垩系碎屑岩体不整合接触,两者工程、水文性质差异巨大,因而在两者之间易形成滑动面。滑坡土体黏性土,渗透性差,致使坡体在持续降雨条件下易饱和,提高了滑体容重,增加下滑力,孔隙水压力增高导致有效应力降低,降低滑坡稳定性。降雨是该滑坡发生的主要诱发因素。

4 滑坡风险分析

根据滑坡现场调查并结合滑坡勘察分析,近几年滑坡体上裂缝数量与宽度均有所增长,滑坡中部平台砖厂持续多年的开挖取土烧砖,导致滑坡后缘不断溯源侵蚀,早期滑坡后缘修筑的截水沟已被损毁,现今滑坡体土质疏松,坡面地表水极易下渗,在雨季滑坡有大规模在此滑动的可能,因此开展危险性分析和风险评价对坡体前缘山阳中学师生的生命财产安全具有重要的实际意义。

山阳中学滑坡风险分析主要包括滑坡危险性评价、承灾体易损性评价、滑坡风险评价 3 个方面。其中,滑坡危险性评价包括:滑坡稳定性分析、滑坡影响范围分析、滑坡失稳概率计算;承灾体易损性评价包括承灾概率计算和承灾体价值损失率计算;承灾体价值损失计算是对各类承灾体在遭受灾害前可能产生的价值损失进行计算。最后,用总风险值来量化滑坡灾害的潜在损失程度^[5-8]。计算公式为:

$$R = P_F \cdot P_L \cdot R_L \cdot C \quad (1)$$

式中: R ——滑坡总风险值; P_F ——滑坡失稳概率; P_L ——承灾概率; R_L ——价值损失率; C ——价值。

4.1 山阳中学滑坡危险性评价

单体滑坡危险性评价过程主要包含:(1)滑坡稳定性分析;(2)滑坡影响范围分析;(3)失稳概率分析。

4.1.1 滑坡稳定性分析 山阳中学滑坡稳定性分析采用定性分析与定量评价相结合。定性分析基于野外调查资料的综合判断;定量计算根据钻探、槽探取样分析资料及实测计算剖面的有关资料,选取有代表性的计算参数,采用极限平衡法进行稳定性计算。

(1)定性分析。坡体组成物质为黏土和粉质黏土,具有膨胀性,膨胀土胀缩裂隙发育深度 2~5 m,与钻探揭露滑面埋藏深度基本一致,集中降雨时,雨水沿裂缝下渗至 2~5 m,因下部黏土已无胀缩裂隙,水分无法继续下渗,聚集在 2~5 m 范围内,由于水的润滑和软化作用,在此形成软弱带,滑坡土体性质

是有利于滑坡的形成。根据钻孔揭露,坡体上没有连续的地下水。因此,可判断集中降雨后,降水极易变成地表径流排除滑坡区外。地下水对滑坡发生不起主导作用。现场调查,坡体上存在多级人工修整的平台,斜坡坡度放缓,坡体表部植被较少,滑体中间的局部地带及左侧边界有少量拉张裂缝,系砖厂开挖取土所致,其余大部地区未见拉张裂缝,滑坡体后部修筑 3 条排水沟,现已损毁。滑坡现今整体变形破坏迹象不明显。综合分析,认为该滑坡体一般情况下处于稳定状态,但在持续强降雨条件下,滑坡可能发生。

(2)定量计算。滑坡稳定性计算中,选取滑坡主滑方向实测纵剖面在 Geo-Slope 软件中进行运算,用 Morgenstern-Price 法计算。考虑到该滑坡体在持续强降雨情况下易发生滑动,故在计算时考虑天然状态及饱和状态分别进行。根据钻探取样土工试验资料,按不同地貌单元进行分层统计分析,得出滑坡区,滑带土,滑体土,滑床土中黏土,粉质黏土的物理力学性质指标参数。天然状态下滑坡稳定性计算时,选取天然土重度值为 18.6 kN。天然土剪切残余强度值,黏聚力值为 8.8 kPa,内摩擦角值为 7.5°。雨季饱和状态下滑坡稳定性计算时,选取土的饱和重度值为 19 kN,重塑土剪切强度,内聚力值 5.5 kPa,内摩擦角值 4.2°。该区地震烈度为 6°,据现场勘查滑坡体处于潜水位以上,所以不考虑地震力和孔隙水压力。计算结果表明,天然状态下, $K=1.99$,说明天然状态下山阳中学滑坡是稳定的;饱和状态下, $K=0.95$ 。说明持续强降雨情况下,山阳中学滑坡整体处于不稳定状态。

4.1.2 滑坡影响范围分析 从山阳中学滑坡基本地质特征分析,滑坡前缘已位于山阳中学最北侧教学楼处,整体看,前缘剪出口较高,滑体中部次级滑带剪出口位于滑坡体中部平台,砖厂取土场。因此,从滑坡变形特征和发展趋势分析,正南方向为滑坡主要变形剪出方向,如果滑坡体大规模快速剪出,可能威胁前缘山阳中学教学区多栋教学楼的安全,因此,需要在滑坡变形特征定性分析的基础上,利用量化模型估算滑体快速滑动的最大距离。

滑坡滑移距离预测,前人通过研究,提出了多种预测模型,包括利用滑坡后缘高程和前缘高程作为参数的经验公式;奥地利学者^[9]通过统计的方法提出以滑坡垂直滑落高度,水平距离和滑坡体积为参数的预测模型;日本学者^[10]通过分析不同体积的滑坡资料,依据滑坡垂直滑落高度,水平滑移距离与滑坡体积的关系,提出滑移距离预测模型;国内众多学者^[11-13]也分别提出了相应的滑移距离预测模型。

根据山阳中学滑坡特殊的地形地貌特点,选取以下 3 个模型进行滑移距离预测,模型为:

模型 1:基于前后缘高程的经验公式:

$$S = 2(H_1 - H_2)$$

式中: S ——滑距(m); H_1 ——滑坡后缘高程(m); H_2 ——滑坡前缘高程(m)。

模型 2:基础滑坡体积的模型:

$$\lg(H/L) = -0.094 \lg V + 0.1$$

式中: H ——滑体垂直滑落高度(滑坡前后缘高差)(m); L ——水平滑移距离(m); V ——滑动体的体积(m^3)。

(3) 模型 3:基于滑坡物理力学参数的模型

$$L = n \cdot H / (0.5 \tan \Phi)$$

式中: L ——滑坡体最大水平滑移距离(m); H ——滑坡前,后缘高差(m); n ——滑坡滑出条件系数,根据经验取 0.2; Φ ——土体的内摩擦角。

根据上述计算方法,计算结果详见表 1。

表 1 3 种模型滑坡失稳漏移距离计算结果

计算模型	滑坡失稳滑移距离/m
模型 1	72
模型 2	87
模型 3	44

根据滑坡水平位移理论计算结果并结合现场实际情况,修正滑坡影响范围,滑坡发生整体滑动最大影响范围约 $12\,000 \text{ m}^2$ 。

4.1.3 滑坡失稳概率分析 滑坡的失稳概率即滑坡发生的概率,是评价滑坡危险性的重要依据之一。滑坡破坏概率分析常用方法有:Monte Carlo 模拟法、可靠指标法、统计矩近似法、随机有限元法等,本文分析主要采用 Monte Carlo 模拟法。Monte Carlo 法基本思想如下:设状态函数为安全系数 $Z = G(X) = F$,根据对稳定性的影响程度选取随机变量。影响滑坡稳定的因素较多,对滑坡稳定可靠度分析成果影响最大的主要是抗剪强度指标黏聚力 C 和内摩擦角 φ 。随机地从变量 C, φ 中分别抽取一个样本点,形成一组样本值 (C_j, φ_j) ,代入状态函数求得一个安全系数的随机样本 F' ,如此重复,直至达到预期精度的充分次数 N ,就可得到 N 个相对独立的安全系数样本值 F_1, F_2, \dots, F_N 。安全系数所表征的极限状态为 $F = 1$,设在 N 次试验中出现 $F \leq 1$ 的次数为 M ,则斜坡的破坏概率为^[5-6,9-11]:

$$P_F = P(F_S \leq 1) = M/N \quad (2)$$

根据山阳中学滑坡实际情况,选取计算剖面在 Geo-Slope 软件中进行模拟运算,采用 Morgenstern-

Price 法计算:滑坡平均稳定性系数为 1.027 9,失稳概率为 7.45%。

4.2 山阳中学滑坡承灾体易损性评价

易损性是在滑坡影响地区,一个或多个对象受破坏或损害的程度,是承灾体属性的表现。承灾体易损性评价包括承灾概率计算和承灾体价值损失率计算^[14]。(1) 承灾概率。当特定风险的滑坡发生时,空间影响范围的概率,在定量分析中,如果滑坡将要达到或者影响到承灾体所在的位置,那么承灾概率是 1。根据前述滑坡影响范围分析可知,考虑滑坡整体滑动最大影响范围,滑坡体整体滑动到达最远距离即到教学区最北侧教学楼处,对教学区内其他教学楼影响较小。因此承灾体承灾概率 $P_L = 1$ 。(2) 承灾体价值损失率。承灾体在遭受特定灾害后的破坏程度,用破坏损失的价值与承灾前原有价值之比表示。根据现场调查,山阳中学滑坡承灾体为学生,教师,教学楼及其他附属建筑。考虑到山阳中学教学楼为钢混结构,受滑坡冲击影响较弱,因此,本文承灾体主要考虑人员损失。参考前人研究已有成果^[15],对人员价值损失率进行赋值。据滑坡的体积,以及他撞击房屋的可能速率,估计滑坡体撞击后房屋内人员死亡的价值损失率为 0.4。

4.3 滑坡风险评价

考虑学生一天在教室时间 16 h,一周 6 d,故学生的时空概率为:

$$P_{(S,T)} = 16/24 \times 6/7 = 0.571 7 \quad (3)$$

滑坡到达承灾体(学校教学楼)的概率为:

$$P_{(L)} = 1 \quad (4)$$

根据滑坡的体积,以及他撞击房屋的可能速率,估计滑坡体撞击后房屋内人员死亡的易损性为:

$$V_{(D,T)} = 0.4 \quad (5)$$

考虑公式(1)中 $R_L \times C$ 表征为价值损失,体现到人员损失可体现为: $P_{(S,T)} \cdot V_{(D,T)}$

故综合上述分析,人员在最大风险中丧命的年概率可:将式(2—5)代入(1)中,即得:

$$\begin{aligned} P_{(LOL)} &= P_{(F)} \cdot P_{(L)} \cdot P_{(S,T)} \cdot V_{(D,T)} \\ &= (0.007 45) \times (1) \times (0.571 7) \times (0.4) \\ &= 1.703 6 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

5 结论

(1) 综合分析滑坡类型、滑体结构、发育特征,山阳中学滑坡是陕西省南秦岭具有代表性的土质滑坡。

(2) 区域地壳差异性运动是滑坡形成的内动力因素,降雨则是导致滑坡发生的主要外在诱因。

(下转第 109 页)

干旱区不同生育期白刺灌丛沙堆土壤呼吸空间异质性

孙涛¹, 韩福贵¹, 郭树江^{1,2}, 段晓峰², 张裕年¹

(1. 甘肃省治沙研究所 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

摘要: [目的] 对干旱区白刺灌丛沙堆不同生育期土壤呼吸空间异质性进行研究, 为今后估算绿洲荒漠区土壤 CO₂ 排放量以及区域碳收支状况提供科学依据。[方法] 利用 Li-8100 土壤呼吸测定系统, 于 2014 年在巴丹吉林沙漠南缘绿洲—荒漠过渡带对白刺灌丛沙堆不同部位的土壤呼吸速率进行野外观测, 分析沙堆上不同位点土壤呼吸日动态变化、不同生长时期的季节变化特征。[结果] (1) 白刺灌丛沙堆在不同生长时期各部位土壤呼吸日动态变化曲线不同, 生长初期和生长休眠期各部位日变化呈“单峰”曲线变化, 在生长旺盛期各部位变化既有“单峰”曲线又有“双峰”曲线; 同时, 日变化峰值出现的时间不一致: 生长初期各位点的峰值出现在上午 11:00 左右, 旺盛期上午出现在 10:00 前后, 下午出现在 17:00 左右, 休眠期出现在下午 14:00 前后。(2) 沙堆上不同部位土壤呼吸速率具有时空异质性, 生长初期和休眠期各部位土壤呼吸速率异质性不显著 ($p > 0.05$), 旺盛期各部位空间差异显著 ($p < 0.01$), 异质性增强; 沙堆各时期平均土壤呼吸速率差异显著 ($p < 0.01$), 大小排序为: 旺盛期 > 生长初期 > 生长休眠期。[结论] 白刺灌丛沙堆上不同部位的土壤呼吸速率日动态变化在不同的生长时期表现不同, 具有明显的时空异质性, 主要是沙堆不同部位近地表层大气水分条件、土壤 20 cm 深处的温度和水分含量的差异共同作用导致了各个位点土壤呼吸通量具有明显的差异性。

关键词: 白刺; 灌丛沙堆; 土壤呼吸; 空间异质性; 日动态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0102-08

中图分类号: S71, K903

文献参数: 孙涛, 韩福贵, 郭树江, 等. 干旱区不同生育期白刺灌丛沙堆土壤呼吸空间异质性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 102-109. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.017

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration of *Nitraria Tangutorum* Nebkhas During Different Growing Period in Arid Areas

SUN Tao¹, HAN Fugui¹, GUO Shujiang^{1,2}, DUAN Xiaofeng², ZHANG Yunian¹

(1. Gansu Desert Control Research Institute, State Key Laboratory of

Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Minqin National Research Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract: [Objective] The spatial heterogeneity of soil respiration in different growing period of *Nitraria tangutorum* in dryland was demonstrated to provide a scientific basis for the estimation of CO₂ emission and for the regional carbon budget in oasis. [Methods] Using Li-8100 soil respiration measurement system, we made field observation of soil respiration rate of *Nitraria tangutorum* nebkhas dominated dunes in 2014. The dunes located in the oasis-desert ecotone on the southern fringe of Badanjara Desert. We measured the daily change at different positions of *Nitraria tangutorum* along growing period, and studied the spatial heterogeneity of soil respiration of *Nitraria tangutorum* at different position and their seasonal variability. [Results] (1) The daily change of soil respiration rate of *Nitraria tangutorum* at different positions and in different growing period were different. It exhibited an unimodal variation both at the beginning of the growing period and at the dormancy season. In flourishing period, both unimodal and bimodal existed for daily respiration. Besides that, the peaks of soil respiration in different growth periods were different; the peak occurred at

收稿日期: 2016-05-15

修回日期: 2016-07-04

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金“干旱区白刺灌丛沙堆发育过程的土壤呼吸时空变化特征及其影响因素”(31300595); 国家自然科学基金地区基金项目(41361004; 41361001); 甘肃省基础研究创新群体计划项目(1506RJIA155)

第一作者: 孙涛(1978—), 男(汉族), 甘肃省永昌县人, 博士, 副研究员, 主要从事荒漠生态、荒漠植被恢复及荒漠化防治研究工作。E-mail: suntaosuny@163.com。

around 11:00 in beginning growth period, the peak of the flourishing period occurred at around 10:00 or 17:00. The peak in dormancy period delayed and occurred at 14:00. (2) There was different spatial heterogeneity of soil respiration rate at different positions on the sand mound. No significant difference ($p > 0.05$) existed for the observations at different dune positions at the beginning of the growing period and at the dormancy period. Whereas there was a significant spatial difference ($p < 0.01$) at the flourishing period. The average soil respiration rate at different growing period varied significantly, had a rank of flourishing period $>$ beginning of the growing period $>$ dormancy period. [Conclusion] Soil respiration rate of *Nitraria tangutorum* at different positions and in different growing period showed significantly spatial heterogeneity, which was mainly resulted from the interaction of near-surface water condition, the temperature and water content above 20 cm soil of *Nitraria tangutorum* at different positions.

Keywords: *Nitraria tangutorum*; nabkhas; soil respiration; spatial heterogeneity; daily change

当前,全球气候变暖、荒漠化面积进一步扩大等生态问题严重威胁着人类生存和社会经济的发展,大气中 CO_2 作为主要的温室气体而备受关注^[1]。土壤呼吸速率相对微小的变化都会显著改变大气中 CO_2 的浓度和土壤碳的累积速率^[2],从而引起全球气候的剧烈变化^[3]。因此研究不同陆地生态系统土壤呼吸通量及调控机制、准确评估全球碳源/汇的时空分布并遏止温室气体浓度的持续升高已经成为当前碳循环和全球气候变化研究中的核心任务和热点问题^[4]。灌丛沙堆是我国干旱、半干旱地区特有的一种生物风积地貌类型,尤其在荒漠过渡带、绿洲边缘地带分布广泛。这些灌丛沙堆在防风固沙、生物多样性保护及维持该区域生态平衡、减少土壤碳释放等方面起着十分重要的作用^[5]。民勤沙区天然年均降水量 110 mm,属于典型的极端干旱区,白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛是民勤沙区目前存活面积最大的天然植被类型,以灌丛沙堆的形式出现,属于旱生或超旱生灌木或小灌木,对阻止土地退化和恢复以及固阻流沙保护绿洲有着极其重要的意义。当前,对干旱、半干旱区不同类型的植被群落土壤呼吸与环境因子的相关性等方面已有相关研究^[6-7]。对白刺灌丛土壤呼吸的研究当前已经展开,例如在不同盖度条件下的白刺灌丛土壤呼吸随着盖度的增加成正相关^[8];模拟人工增雨过程中白刺土壤呼吸特征的变化过程等^[9-10],以及在极端干旱区白刺灌丛土壤呼吸对天然降雨的影响以及驱动因子的研究^[11]等,但是针对荒漠—绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤呼吸的时空变异性和动态变化特征方面却鲜有报道。而植物生长过程中根部积沙会形成隆起的沙包,随着沙堆发育逐年增加,沙包体积也会发生变化,稳定阶段的白刺沙包会形成半椭球体形状,这种小尺度的地貌形态特征是否对土壤呼吸速率产生变异特性,灌丛沙堆不同部位的土壤呼吸速率日动态、季节动态变化如何等问题都需要去探究。为此,本试验以民勤绿洲荒漠过渡带

白刺灌丛沙堆为研究对象,研究灌丛沙堆上不同位点之间土壤呼吸速率的空间变异性,不同时间段土壤呼吸的动态变化特征,从而对白刺灌丛沙堆土壤呼吸的变化特征和空间异质性有更深入的认识,为今后估算绿洲荒漠区土壤 CO_2 排放量以及区域碳收支状况提供准确的科学依据。

1 研究区概况

石羊河下游的民勤绿洲荒漠过渡带地处巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠交汇处,是我国干旱区具有独特自然地理特征的典型过渡地带。民勤绿洲外围形成了大量灌丛沙包与丘间地相间分布的景观格局,对维护民勤绿洲生态环境减少风沙危害,遏制流沙前移、稳定绿洲环境起到了重要的生态作用。本研究选择位于巴丹吉林沙漠东南缘民勤西沙窝的民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站 3 号塔(38°34'N,102°58'E)附近的荒漠—绿洲过渡带开展野外观测研究,属典型大陆性气候。据观测站 2014 年气象观测资料统计表明:2014 年年均气温 8.5 °C,极端最高气温 37.7 °C(2014 年 6 月 17 日),极端最低气温 -20.5 °C(2014 年 1 月 9 日);光热充足,全年日照时数达 2 534 h,年总降水量 127 mm,主要集中于 6—9 月,占年总降水量的 75.12%,年蒸发量 1 559.7 mm,干燥度 5.15,最高达 18.7,相对湿度 54%;沙尘暴日数 10.0 d,浮尘日数 11.0 d,年度平均风速 1.0/m·s。土壤以碱性风沙土为主,沙层深厚,肥力很差,表层 0—20 cm 土层含盐量 0.146%,有机质为 0.197 5%,全氮 0.007 9%,全磷 0.116%,pH7.35~8.57,潜水埋深 16 m 以下,土层中的沙粒占总粒径组成的 72.3%~90.5%^[12]

2 研究方法

2.1 样地设置及基本特征

本研究选择在民勤治沙站 3 号塔附近的荒漠—

绿洲过渡带为研究地点,此过渡带上广泛分布有发育良好的白刺灌丛沙堆。首先通过野外调查设置样地,样地大小 50 m×50 m。在样地中根据白刺灌丛沙堆的外部形态特征,植被生长状况和植被覆盖度等基本

情况,选择处于稳定生长阶段,生长状态相似的沙堆 3 个进行土壤呼吸的观测研究。对沙堆长轴、短轴、植被覆盖度等基本特征指标进行调查测量。灌丛沙堆基本特征详见表 1。

表 1 白刺灌丛沙堆基本形态特征

项目	沙堆形态/cm			迎风坡		背风坡		平均盖度/ %	植株高度/ cm
	长轴	短轴	包高	坡长/cm	坡角/(°)	坡长/cm	坡角/(°)		
平均	1 050.00	913.33	235.83	653.67	21.83	573.50	21.00	58.88	37.51
标准差	174.01	235.34	55.54	115.08	3.71	90.45	5.47	11.85	5.49

2.2 土壤呼吸速率测定

2.2.1 土壤呼吸观测位点的确定 采用基于红外气体分析法原理的土壤呼吸测定系统 Li-8100(美国 Li-Cor 公司),对白刺灌丛沙堆进行土壤呼吸日动态测定。沿主风方向依次在沙包迎风坡下部(YX)、中部(YZ)、顶部(YD),背风坡中部(BZ)、下部(BX),沙堆正侧面中部(ZC)、背侧面中部(BC),共 7 个部位设置观测位点。2014 年 5 月份在观测前两天在各观测位点设置土壤呼吸 Collar 环。土环由 PVC 材料制成,圆柱状,直径 10 cm,高 10 cm,插入土层约 8 cm,上边缘离地表 2 cm。在每次观测时选择晴朗、无风的典型天气进行沙堆土壤呼吸观测,每次观测持续 2~3 d。

2.2.1 观测时间 选择白刺在一年当中不同的生长发育期进行沙堆各位点的土壤呼吸观测。2014 年 5 月,此时正值春季,土壤解冻,气温回暖,是白刺灌丛当年生长发育的初期;2014 年 8 月,正值研究区夏季,水热同期,是白刺灌丛生长旺盛、生物量积累最多的时期^[13];2014 年 11 月,此时已进入冬季,白刺灌丛生长停滞处于休眠时期。在每次观测前一天去除底座内的植物和枯落物,日动态变化测定时间为 6:00—20:00,每隔 2 h 测定 1 次。依次从第 1 个位点开始观测,每次观测 3 次重复,系统默认观测时间约 3 min,观测完 1 个位点后即刻移至第 2 个位点观测,依次类推,进行沙堆不同位点空间变化的观测。

2.3 环境因子测定

土壤呼吸测定系统在测定的同时即时监测近地表面(0—20 cm)大气湿度、大气水分含量等相关的气象因子;土壤温度采用仪器自带的温度探头,可观测土层 20—30 cm 深度土壤温度。土壤水分采用烘干法测定,为了不破坏沙堆的地貌状况,使用沙土钻,在每个土环附近分层采集鲜土样,土层厚度分别为 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,用铝盒装好后带回实验室烘干称重。野外观测样地离治沙站 3 号沙尘塔直线距离约 200 m,地势平坦,因此观

测当日的大气温度、湿度变化均采用该塔距地表 2 m 处的观测数据代表该试验样地的气象资料。白刺灌丛当年不同生长时期观测当日的大气温湿度日变化如图 1 所示。由图 1 可以看出,发育期正值春季,气温 4~26 °C,土壤解冻,植被开始生长;旺盛期正值盛夏,水热同期,气温 18~33 °C,均温达到 22 °C,由于连续干热,大气湿度早晚高,白天较低,约 6%;休眠期已进入冬季,植被停止生长,早晚温度降为零点以下,中午时分温度最高,为 9 °C 左右。

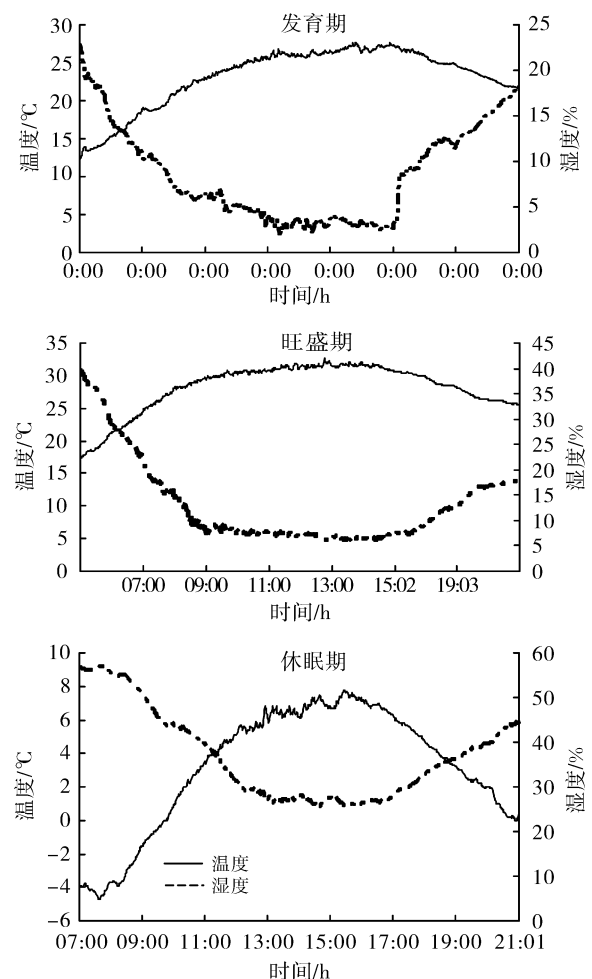


图 1 研究区不同生长期大气温湿度日变化

2.4 数据处理

以 Excel 2000 软件进行土壤呼吸各时间段数据的整理计算,并绘制各个日动态图。利用 SAS 9.2 进行数据统计分析,调用 ANOVA 程序对不同生育时期各位点土壤呼吸速率进行差异性分析(显著水平 $p < 0.5$,极显著水平为 $p < 0.01$);调用 PROC CORR 程序对土壤呼吸与气象因子、近地表层大气温湿度、土壤水分、温度等环境因子进行回归分析,最后采用逐步回归分析法逐步选入对土壤呼吸速率影响最大且达到显著水平的相关因子,建立最优回归模型。

3 结果与分析

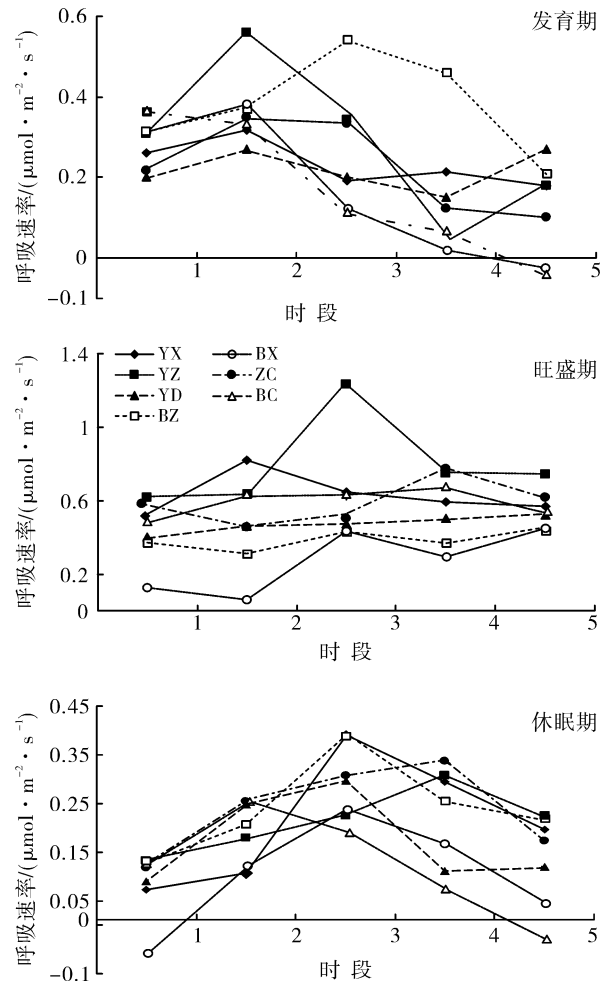
3.1 白刺沙堆生长时期不同位点土壤呼吸日动态

白刺沙堆上不同位点之间土壤呼吸日动态变化趋势不尽相同。

5月份白刺处于生长发育初期。各位点土壤呼吸变化以单峰曲线为主(图2),整体变化范围在 $0.03 \sim 0.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 间波动,各位点峰值基本出现在 11:00 前后,其峰值大小为 $0.26 \sim 0.56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但是个别位点如 YZ, YD 土壤呼吸日动态呈双峰曲线,第1次峰值出现在 12:00 前后,第2次峰值出现在下午 18:00 左右,其值均低于第1次峰值,均呈逐渐下降趋势。生长旺盛期(8月)白刺沙堆各位点土壤呼吸整体波动性大,(如图2所示),其值均增大,土壤呼吸通量在 $0.1 \sim 1.23 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 间波动,各位点日动态变化较为复杂,有单峰型和双峰型2种曲线混合变化,其中 YD, BZ, BX, ZC 日动态变化呈双峰曲线,但是峰值变化不明显,早晨在 9:00 前后,下午峰值波动在 18:00 左右。此时段正午时刻大气温度高,湿度低,微生物活性低,导致最热的时刻土壤呼吸值呈下降趋势。但是,各位点土壤碳释放量均较高,呼吸速率峰值变化在 $0.42 \sim 1.23 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 间波动。

生长休眠期(11月)各位点土壤呼吸日动态变化均呈单峰曲线变化如图2所示。

由图2可见,土壤呼吸率的变化范围为 $-0.05 \sim 0.39 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相比生长初期和生长旺盛期此时段各位点土壤呼吸日动态变化曲线较为简单,土壤呼吸释放量早晚低,个别位点在早晚出现微小的负值波动,主要是因为此时温度过低造成(图2),随着气温升高,土壤呼吸量逐渐升高,各位点峰值集中出现在 13:00 前后,在 $0.22 \sim 0.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 间波动,之后呈下降趋势。



注:时段1表示7:00-9:00时段;2表示10:00-12:00时段;
3表示13:00-15:00时段;4表示16:00-18:00时段;
5表示19:00-20:00时段。

图2 白刺灌丛沙堆不同生育期各个位点土壤呼吸日动态

3.2 白刺灌丛沙堆不同位点空间异质特性

白刺灌丛沙堆不同位点的土壤呼吸速率值变化不一,对各位点土壤呼吸日均通量值方差分析表明各位点间具有差异性,随着时间的不同各位点的空间异质性也发生了变化(表2)。生长初期,背风坡中部(BZ)、下部(BX)和沙堆背侧面(BC)之间差异显著,其余位点之间差异不显著;生长旺盛期沙堆上各部位之间土壤呼吸量分异明显,沙堆顶部(YD)与迎风坡中部(YZ)、背风坡底部(BD)以及侧面(ZC, BC)均差异显著,土壤呼吸分异明显,沙堆两侧面(ZC, BC)相互间差异不显著,但是与迎风坡和背风坡中部有差异,沙堆不同位点之间空间异质性增强($p < 0.01$);白刺生长休眠期沙堆各个位点土壤呼吸量均较低,各位点间差异性不显著($p > 0.05$),异质性不强。对不同时期沙堆的土壤呼吸速率方差分析表明,沙堆在不同生长时期土壤呼吸也存在差异性,旺盛期相比生长

初期和休眠期差异显著 ($p < 0.01$), 而生长初期和休眠期之间不显著 ($p > 0.05$), 土壤呼吸速率均值大小排序为: 旺盛期 > 发育初期 > 休眠期, 其值分别是

0.53, 0.24, 0.18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由此表明白刺灌丛沙堆不同空间位置其土壤呼吸释放具有空间异质性, 并且随着时间的不同空间差异发生了相应的变化。

表 2 不同生长期各位点土壤呼吸差异性比较

生长时期	不同位点							统计值		
	YX	YZ	YD	BZ	BX	ZC	BC	均方	F 值	概率
发育期	0.23 ^{ab}	0.28 ^{ab}	0.22 ^{ab}	0.18 ^{ab}	0.17 ^{ab}	0.22 ^{ab}	0.39 ^{ab}	0.03	1.59	>0.05
旺盛期	0.63 ^{ab}	0.79 ^{ab}	0.47 ^{ab}	0.39 ^{cd}	0.27 ^d	0.58 ^b	0.60 ^b	0.14	7.68	<0.01
休眠期	0.21 ^a	0.21 ^a	0.17 ^a	0.12 ^a	0.1 ^a	0.24 ^a	0.24 ^a	0.023 ^a	1.61	>0.05

注: 同行内进行差异性分析, 相同字母表示土壤呼吸速率差异不显著 ($p > 0.05$), 不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

3.3 沙堆各位点土壤呼吸速率与水分的关系

在干旱区水分是关键因子也是限制性因素。白刺灌丛沙堆不同位点的平均土壤含水量在不同的生长时期含量不同。生长初期土壤水分含量最小, 各位点土壤水分含量在 0.1%~0.5% 之间, 平均含水量为 0.3%; 生长旺盛期土壤含水量最高, 各位点在 1.7%~3.1% 之间, 平均含水量为 2.6%; 生长休眠期土壤含水量居中, 在 1.5%~2.3% 之间, 平均含水量为 2.0%。

对不同土层的土壤水分含量与土壤呼吸间的相关性分析表明: 土壤 5—10, 10—20 cm 土层与呼吸速率显著相关 ($p < 0.05$), 而表层土壤 0—5 cm 和 40 cm 深的土层水分含量相关性不明显 ($p > 0.05$), 表明各位点土壤呼吸速率变化与土层 5—20 cm 深土壤含水量关系紧密(表 3), 而这一深度的土壤也是微生物含量最多和植被根系生长最为旺盛的土层。

表 3 土壤呼吸速率与各层土壤水分含量相关性

项目	Flux	Soil _{5 cm}	Soil _{10 cm}	Soil _{20 cm}	Soil _{40 cm}
Flux	1.00				
Soil _{5 cm}	0.27	1.00			
Soil _{10 cm}	0.47*	0.79**	1.00		
Soil _{20 cm}	0.46*	0.75**	0.93**	1.00	
Soil _{40 cm}	0.38	0.67**	0.83**	0.84**	1.00

注: Flux 为土壤呼吸速率; Soil_{5 cm} 为土层 5 cm 深处土壤水分含量; Soil_{10 cm} 为土层 10 cm 深处土壤水分含量。依次类推。

对各位点土壤呼吸速率与土层 5—20 cm 土壤含水量进行拟合发现, 白刺灌丛在不同的生长发育时期各位点土壤呼吸速率与土壤含水量间的拟合曲线各不相同。

拟合结果表明, 在发育初期土壤呼吸与各位点土壤含水量呈指数变化趋势 ($R^2 = 0.53$), 在生长旺盛期土壤呼吸与水分含量间的线性关系不明显 ($p > 0.05$); 在生长休眠期各位点土壤呼吸速率与水分含量之间呈幂函数分布 ($R^2 = 0.28$)。表明白刺灌丛在

低水分环境中, 土壤呼吸对水分变化的响应趋势显著, 敏感性强, 而随着水分含量的增大, 各位点土壤呼吸变化差异性增大。

3.4 沙堆土壤呼吸速率与环境因子相关性

白刺灌丛在不同的生长发育季节环境因子也在变化。对沙堆各位点土壤呼吸速率与相关的环境因子如大气温湿度、近地表饱和水分含量、土壤温度等进行相关性分析发现, 白刺在不同的生长发育期对土壤呼吸起到主要作用的环境因子不同。

相关性分析表明, 在白刺生长发育期土壤呼吸速率与土层 20 cm 深的地温具有明显的负相关性 ($R^2 = -0.97$), 且二者间的相关系数达到了显著水平 ($p < 0.01$), 其原因是此时正值初春, 气温升高, 土壤解冻, 由于没有有效水分补充, 土壤水分散失严重, 沙堆土壤水分含量很低, 平均含水量仅为 0.3%。因此, 土壤水分成为制约生长初期土壤呼吸速率的主要因素, 地温升高使土壤水分进一步减少, 导致土壤呼吸速率降低。

在生长旺盛期, 土壤呼吸速率与近地表层大气相对湿度呈显著的负相关 ($R^2 = -0.90$, $p < 0.05$), 与土壤温度的相关性降低, 与大气温湿度的相关性均增加。从土壤呼吸日动态变化和大气湿度变化的趋势上看, 其关系密切, 可能与此时段沙丘表层水分含量有关, 沙丘含水量较好, 影响了近地表层大气温湿度的变化, 进而对土壤呼吸速率产生了影响。

在生长休眠期, 土壤呼吸与大气温度存在正相关关系, 而与湿度之间存在着负相关关系, 且彼此间的相关系数均达到了显著水平 ($p < 0.01$) (表 4)。

3.5 白刺灌丛沙堆土壤呼吸最优回归模型

土壤温度、土壤水分条件以及其它环境因子对土壤呼吸异质性所起的作用随着白刺不同的生长发育时期而发生了变化(表 3—4)。采用逐步回归分析方法(Stepwise)挑选出对土壤呼吸影响最大且达到显著水平的自变量因子, 然后逐步选入其它因子中对土

壤呼吸量影响最大且达到显著水平的变量,并建立土壤呼吸速率与相关因子的最优回归方程,探讨白刺灌

丛沙堆在整个生长期影响土壤呼吸变化的重要因子,分析结果如表 5 所示。

表 4 不同生长期土壤呼吸速率与环境因子相关系数矩阵

生育期	项目	Flux	Sf _{H₂O}	Sf _{RH}	Air _{temp}	Air _{RH}	Temp _{20 cm}
发育期	Flux	1.00					
	Sf _{H₂O}	0.69	1.00				
	Sf _{RH}	0.13	-0.09	1.00			
	Air _{temp}	-0.26	0.01	-0.98**	1.00		
	Air _{RH}	-0.48	-0.29	0.77	-0.67	1.00	
	Temp _{20 cm}	-0.97**	-0.50	-0.12	0.26	0.53	1.00
旺盛期	Flux	1.00					
	Sf _{H₂O}	-0.70	1.00				
	Sf _{RH}	-0.90*	0.93*	1.00			
	Air _{temp}	0.70	-0.98**	-0.92*	1.00		
	Air _{RH}	-0.71	0.96*	0.92*	-0.99**	1.00	
	Temp _{20 cm}	-0.32	-0.31	-0.03	0.40	-0.41	1.00
休眠期	Flux	1.00					
	Sf _{H₂O}	-0.03	1.00				
	Sf _{RH}	-0.71	0.70	1.00			
	Air _{temp}	0.97**	-0.17	-0.78	1.00		
	Air _{RH}	-0.96**	0.23	0.82	-0.99**	1.00	
	Temp _{20 cm}	0.08	-0.95*	-0.75	0.22	-0.28	1.00

注:(1) *表示 $p < 0.05$ 的显著水平; **表示 $p < 0.01$ 的显著水平。(2) Temp_{20 cm} 为土壤 20 cm 处地温; Sf_{H₂O} 为近地表层大气水分含量; Sf_{RH} 为近地表层大气相对湿度; Air_{temp} 为大气温度; Air_{RH} 为大气湿度。

表 5 土壤呼吸与相关因子逐步回归模型

变量	回归步骤	参数估计值	标准误	偏决定系数	模型决定系数	F 值	概率 $P_r > F$
截距		1.093 72	0.200 60			29.73	<0.000 1
X ₁ (Sf _{H₂O})	1	0.271 11	0.037 31	0.537 5	0.537 5	52.80	<0.000 1
X ₂ (Sf _{RH})	2	-0.054 02	0.008 85	0.162 3	0.699 8	37.25	<0.000 1
X ₃ (Temp _{20 cm})	3	-0.050 93	0.009 97	0.158 0	0.857 8	26.08	0.000 1
X ₄ (Soil _{40 cm})	4	-0.046 11	0.021 74	0.031 2	0.889 0	4.50	0.049 9

注:所有保留在模型中的变量都达到了 0.05 的显著水平,没有其它变量达到进入模型的 0.05 的显著水平。

以上结果是经逐步回归保留到方程中的 4 个变量,分别是近地表大气饱和和含水量(Sf_{H₂O})、近地表相对湿度(Sf_{RH})、20 cm 深土壤温度(Temp_{20 cm})和土壤 20—40 cm 土层水分含量(Soil_{40 cm}),可以建立最优回归方程:

$$Y_{(Flux)} = 1.093 7 + 0.271 1 X_1 - 0.054 0 X_2 - 0.050 9 X_3 - 0.046 1 X_4$$

方程中,首先保留的是近地表层大气饱和和水分含量和相对湿度,表明灌丛沙堆土壤呼吸作用与近地表大气水分状况非常密切,其次是 20 cm 深土层温度和 20—40 cm 深土壤水分含量,表明近地表层大气水分条件、土层 20 cm 处的水分和温度共同作用对沙堆不同位点的土壤呼吸速率起作用。模型中参数的估计

值都达到了显著水平 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$),模型决定系数 $R^2 = 0.889$,回归模型方程达到显著水平 ($p < 0.05$),表明土壤呼吸速率与上述 4 个因子具有显著的线性回归关系,而与其它的因子无显著的回归关系,所建立的回归方程具有较高的可靠性。由此可以运用此模型对白刺灌丛沙堆土壤呼吸速率在不同的日变化尺度和不同的空间位置上产生的时空异质性做出 88% 以上的原因解释。

4 讨论

土壤呼吸是一个十分复杂的土壤生态学过程,主要包括土壤微生物、土壤动物呼吸和植物根系的呼吸 3 大部分。影响土壤呼吸的主导因子有时候不尽相

同,如气象因子、植物群落的类型和不同发育阶段、土壤理化性状等。温度条件在一定程度上是影响总土壤呼吸速率的主要因子,但是在干旱、半干旱地区这种情况有所不同,温度在半干旱地区并不始终是影响灌丛植物土壤呼吸变化的主要因素:通过对油蒿灌丛^[14]、胡杨群落、梭梭林等^[6,15]的土壤呼吸速率与土壤温度等关系的研究也表明二者之间并未有固定的相关关系,说明不同荒漠群落土壤呼吸速率与土壤温度并没有固定的相关关系。在本研究中白刺灌丛沙堆土壤呼吸速率与地下 20 cm 的温度相关性并不显著,但是与近地表层大气水分含量和地下 20 cm 的土壤水分含量呈显著正相关关系,说明在水分条件为关键因子的干旱区,水分对白刺灌丛沙堆土壤呼吸速率的作用要比温度更具有影响作用,这一结果同沙漠区人工植被群落和荒漠灌木林地土壤呼吸的影响因素相同^[16-17]。

白刺灌丛沙堆在形成、发展和演变的动态过程中与周边环境因素密不可分,因此,白刺灌丛沙堆自身在小尺度上的空间差异使得其生物学和生态学过程也产生了异质性^[18]。白刺灌丛沙堆土壤呼吸的空间异质性随着发育时间的不同而发生变化(图 2,表 2),具有时空变异特性。春季生长初期,沙堆土壤温度和水分波动大,各部位的异质性开始显现,在生长旺盛期凸显,各位点之间的土壤呼吸速率差异显著,而随着气温的降低,地表温度也逐渐降低,在休眠期这种位点间的空间差异性又逐渐的降低减弱。由此表明,处于稳定阶段的白刺灌丛沙堆由于自身小尺度范围内土壤温度、水分的空间差异导致了沙堆上不同位点土壤呼吸通量具有明显的异质性,而这种异质性又随着沙堆发育时间的不同而发生变化。沙丘不同部位(坡底、坡中和坡顶)土壤呼吸速率的日变化呈“双峰曲线”,而在水分条件好的时候又可转变为“单峰曲线”^[19],相比这种单一的曲线变化,白刺灌丛沙堆上不同部位的日动态曲线变化较为复杂,因为不同部位的日动态变化是单峰和双峰曲线均有,尤其在水热同期的生长旺盛期更为明显(图 2)。逐步回归分析表明白刺灌丛沙堆土壤呼吸速率在不同的日变化尺度和不同的空间位置上产生的时空异质性是由近地表层大气水分条件、土壤 20 cm 深处的温度和湿度共同影响决定的,由此所拟合的模型能够解释影响土壤呼吸速率变化 88% 以上的原因。有研究表明灌丛沙堆的植被盖度对塑造沙堆形态起到了重要的作用,对沙堆的土壤呼吸也产生了重要的影响,有极显著的正相关性作用。

本研究中处于稳定阶段的沙堆迎风坡植被的盖

度要比背风坡好(表 1),其郁闭度高,进而影响了沙堆不同部位的水热分布,使得沙堆各部位土壤呼吸的空间异质性增强。同时灌丛沙堆不同部位地上植被盖度不同其地下生物量也有差异^[20],这也是造成沙堆土壤呼吸速率空间异质性的重要原因。在时间尺度上,白刺灌丛沙堆土壤呼吸同草地、灌木林地具有明显的季节变化特点^[21],夏秋季高,冬春季低,但是对水分的敏感性有时候也使的白刺灌丛沙堆的土壤呼吸在春季(5—6 月)要高一些,究其原因与年度降雨时空差异性和降雨频次有关,干旱半干旱地区的降雨可以促进沙堆表层微生物存活和快速繁殖,这样使得土壤呼吸速率可在较短的时间段内相对增大^[22]。

5 结论

(1) 白刺灌丛沙堆上不同部位的土壤呼吸速率日动态变化在不同的生长时期表现出不同的动态变化:在生长旺盛期沙堆各部位日动态变化既有“单峰曲线”,又有“双峰曲线”变化,而在生长初期和休眠期各部位的土壤呼吸日动态变化趋于一致,基本呈单峰曲线变化,但是峰值出现的时间有所不同。

(2) 白刺灌丛沙堆各部位土壤呼吸速率与土壤 5—20 cm 水分含量关系密切,呈显著正相关关系($p < 0.05$);各位点土壤呼吸速率与土壤含水量的响应趋势随着生长时期的不同发生了明显的变化,沙堆水分含量逐渐增大,各位点土壤呼吸速率差异性增大。

(3) 白刺灌丛沙堆不同部位土壤呼吸速率具有空间异质性,并随着沙堆发育时间的不同而具有时空变异特性。这种时空异质性是由白刺灌丛沙堆自身小尺度范围内产生的局部空间异质性变化而引起土壤呼吸速率的变化。逐步回归分析表明灌丛沙堆不同部位近地表层大气水分条件、土壤 20 cm 深处的温度和湿度共同作用导致了沙堆上土壤呼吸通量具有明显的异质性,回归模型能够解释土壤呼吸速率变化 88% 以上的原因。

[参 考 文 献]

- [1] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus Series B: Chemical & Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [2] Oliver J E. Intergovernmental panel in climate change (IPCC)[J]. *Encyclopedia of Energy Natural Resource & Environmental Economics*, 2013, 26(14): 48-56.
- [3] Marland G, Boden T A, Andres R J, et al. Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions [C].

- Trends; A Compendium of Data on Global Change, 2009.
- [4] 韩广轩,周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 197-205.
- [5] 王涛主编. 中国沙漠与沙漠化[M]. 河北 石家庄:河北科学技术出版社, 2003.
- [6] 黄湘,李卫红,陈亚宁,等. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1951-1959.
- [7] 杨建军,吕光辉,张燕,等. 艾比湖流域土壤呼吸日变化及水热因子影响[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(2): 223-231.
- [8] 靳虎甲,马全林,张有佳,等. 石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 140-147.
- [9] Song Weimin, Chen Shiping, Wu Bo, et al. Vegetation cover and rain timing co-regulate the responses of soil CO₂ efflux to rain increase in an arid desert ecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49(1): 114-123.
- [10] 贾子毅. 干旱区白刺荒漠生态系统土壤呼吸对增雨的响应[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.
- [11] Liu Dianjun, Wu Bo, Li Yonghua, et al. Effect of rain enrichment on soil respiration of *Nitraria sphaerocarpa* community in a hyperarid area[J]. Sciences in Cold & Arid Regions, 2013, 5(6): 722-732.
- [12] 徐先英,严平,郭树江,等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141-145.
- [13] 李鸿儒,王继和,蒋志荣,等. 白刺沙包发育过程的土壤水分与根系生物量的关系[J]. 甘肃农业大学学报, 2010(06): 42-46.
- [14] 孟祥利,陈世苹,魏龙,等. 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1152-1158.
- [15] 杨建军,吕光辉,张燕,等. 艾比湖流域不同植物群落土壤呼吸研究[J]. 环境科学研究, 2009(3): 362-370.
- [16] 张志山,谭会娟,王新平,等. 沙漠人工植被区土壤呼吸初探[J]. 中国沙漠, 2005(4): 73-75.
- [17] 朱宏,赵成义,李君,等. 干旱区荒漠灌木林地土壤呼吸及其影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 856-860.
- [18] Hesp P A. The formation of shadow dunes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1981, 51(1): 140-144.
- [19] 禹朴家,徐海量,王炜,等. 沙丘不同部位土壤呼吸对人工降水的响应[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 437-441.
- [20] 闫美芳,张新时,周广胜. 不同树龄杨树(*Populus balsamifera*)人工林的土壤呼吸空间异质性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1378-1384.
- [21] 严俊霞,李洪建,汤亿,等. 小尺度范围内植被类型对土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3121-3129.
- [22] 陈书涛,胡正华,张勇,等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2184-2192.

(上接第101页)

(3) 根据现场调查及室内分析计算,该滑坡现处于基本稳定状态,但不排除遭遇极端气候下复活的可能,滑坡复活概率为7.45%,分析了该滑坡风险性,山阳中学滑坡灾害个体生命风险为每年 1.7036×10^{-3} 。

[参 考 文 献]

- [1] 王滔,吴增养,赵学理. 陕西省山阳县地质灾害发育特征与移民选址原则[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 3(23): 23-26.
- [2] 郑苗苗,牛树轩,郑泓. 基于GIS的延河流域滑坡崩塌地质灾害空间分布及其引发因素分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 156-160.
- [3] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 46-49.
- [4] 门玉明,荆万魁,杨向军. 山阳中学滑坡治理可行性报告[R]. 陕西 西安:长安大学, 2003.
- [5] 唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析[J]. 地质通报, 2008, 8(27): 1217-1222.
- [6] 刘鑫,陈齐,吴树仁,等. 陕西陇县李家下滑坡风险评价[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 895-903.
- [7] 黄志全,孟令超,黄向春,等. 基于数量化理论和BP神经网络
- 网络的滑坡体积预测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 207-213.
- [8] 同霄,彭建兵,朱兴华,等. 降雨作用下黄土浅层滑坡的危险性分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 109-113.
- [9] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1973, 5(4): 231-236.
- [10] 吴树仁,石菊松,王涛,等. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [11] 罗文强,黄润秋,张倬元. 几种边坡可靠性数学模型的对比[J]. 山地学报, 2000, 18(1): 42-46.
- [12] 叶超,郝付军. 基于支持向量机和BP神经网络的滑坡变形复合式预测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 332-327.
- [13] 张世林,孙金辉,马娇. 数量化理论Ⅲ在川东红层岩质滑坡研究中的应用[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 140-145.
- [14] 高波,王佳运,张成航,等. 陕南勉县照壁山滑坡形成机制及风险评价[J]. 工程地质学报, 2011, 19(S): 26-30.
- [15] 梅保,陆玉梅. 人的生命价值评估方法述评[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(3): 56-60.