山西省天龙山弃耕地的根系呼吸及其影响因素

王礼霄，严俊霞，李洪建，李君剑

（山西大学 黄土高原研究所，山西 太原 030006）

摘　要：用去除根系法对山西省天龙山自然保护区弃耕地的根系呼吸进行了为期 2 a 的研究。结果表明，弃耕地的根系呼吸速率具有明显的季节变化，与土壤温度的变化趋势相一致，夏季高冬春季低。2007 和 2008 年 3—12 月的根系呼吸总量（以 C 计）分别为 329.5 和 392.5 g/m^2。土壤温度是影响根系呼吸速率的主导因子，可以解释根系呼吸速率季节变化的 79%～88%，土壤水分对根系呼吸的影响较小。包括土壤温度和土壤水分两个变量的双因素模型可以解释根系呼吸季节变化的 81%～89%；根系呼吸占土壤总呼吸的比例具有明显的季节变化，为 24%～54%；2007 和 2008 年 3—12 月根系呼吸比例的平均值分别为 24.9%和 30.9%。

关键词：根系呼吸；土壤温度；土壤水分；弃耕地

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)05-0029-05　　**中图分类号**：S154，S181

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.013

Root Respiration and Its Affecting Factors in Abandoned Land in Tianlong Mountain Area of Shanxi Province

WANG Li-xiao, YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian

(*Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*)

Abstract: Using root exclusion method, and based on the field observation data of root respiration in a period of two years from an abandoned land soil in Tianlong mountain area of Shanxi province, we analyzed the relationships between root respiration and environmental factors. The results showed that the root respiration in the abandoned land exhibited a seasonal variation following the variation in soil temperature, with high values in summer and low values in winter. In terms of carbon content, the root respirations in 2007 and 2008 was 329.5 and 392.5 g/m^2 from March to December, respectively. Soil temperature was a main factor influencing root respiration, and it could explain a variation of respiration from 79% to 88%. Soil moisture had little impact on root respiration. The model including soil temperature and soil water content variables could explain the seasonal variation of root respiration from 81% to 89%. The percentage of root respiration in total soil respiration changed over the season between 24% and 54%. Percentage of the mean root respiration from March to December in the total soil respiration in 2007 and 2008 was 24.9% and 30.9%, respectively.

Keywords: root respiration; soil temperature; soil moisture; abandoned land

根系呼吸占土壤总呼吸的比例是确定陆地生态系统碳平衡关系和土壤有机碳周转速率的关键参数之一，对于精确估计全球变化对土壤碳储量和循环的影响非常重要[1-2]。尽管区分根系呼吸与土壤总呼吸的方法较多[3]，但是根去除法由于操作简便，灵活性较强，资金花费少等特点，在野外工作中得到非常广泛的应用[4]。目前对温带草原与农田的根系呼吸的组分研究相对较少[5]。

弃耕地是指原来进行农业经营的土地不再进行农业耕种而撂荒的土地。近年来，中国实施的“退耕还林还草工程”使大量耕地退耕。尽管这些退耕地的大部分通过植物措施得到一定程度的治理，但是仍有一大部分处于自然植被演替的过程中，变成了弃耕地。研究弃耕地在自然演替过程中的土壤和根系呼吸，对于了解不同演替阶段的土壤碳循环特点具有重要意义。然而目前对弃耕地土壤呼吸和根系呼吸的

收稿日期：2013-08-28　　修回日期：2013-09-29

资助项目：山西省自然科学基金项目“环境因子对森林生态系统土壤呼吸时、空变异的影响机理”(2012011033-5)；国家自然科学基金项目“陆地表面辐射温度对土壤呼吸的影响机理及其模型构建”(41201374)

作者简介：王礼霄(1988—)，女(汉族)，山西省汾阳市人，硕士研究生，研究方向为生态系统碳循环。E-mail:525079118@qq.com。

通信作者：严俊霞(1976—)，女(汉族)，山西省洪洞县人，博士，讲师，主要从事生态系统碳循环研究。E-mail:yjx422@sxu.edu.cn。

研究还未见报道。作者在 2005 年曾对弃耕地土壤呼吸的季节变化及其与环境因子的关系进行了探讨[6]。之后,在该弃耕地内选择一定区域进行了去根处理。本研究通过对去根和不去根样地的定位测定,分析了根系呼吸的季节变化及其与环境因子的关系,对根系呼吸占土壤呼吸总量的比例进行了估计,以期为碳循环研究提供基本数据。

1 试验设计与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于山西省天龙山国家自然保护区,海拔 780～1 470 m 左右。区内气候属暖温带半干旱大陆性季风气候。据太原晋源气象站 1971—2000 年的气象记录,年平均降水量 478.4 mm,主要集中在 7—9 月。区内四季分明,年平均气温 10 ℃,最高月平均气温 23 ℃,出现在 7 月;最低月气温 −6.4 ℃,出现在 1 月。

试验地为 20 世纪 90 年代后期退耕农田撂荒后自然演替而成的草地,总面积约 3 hm^2。海拔 1 440 m 左右,地形平坦。土壤为黄土质褐土性土,黏粒含量 35.2%,土层深厚,土壤容重为(1.24 ± 0.08)g/cm^3,田间持水量为(24.26±1.04)%。主要草本植物为白莲蒿(*Artemisia sacrorum*),盖度 60%以上,平均高度 48.7 cm;白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)盖度 10%左右,高度 44 cm;其他植物有野艾蒿(*A. lavandulaefolia*)、线叶柴胡(*Bupleurum angustissimum*)等。此外有黄刺玫(*Rosa xanthina*)灌木零星分布。试验地的总盖度 90%左右,植物的总生物量为 1.12 kg/m^2。

1.2 研究方法

1.2.1 *试验设计及方法* 在研究区内根据弃耕地内植被类型的空间分布和盖度情况,于 2006 年 4 月在区内选择典型植被类型,根据植被的空间分布和相对盖度特征选取具有代表性的 2 个 10 m×10 m 试验区域,每个小区设 2 个 2 m×2 m 的小区,作为对照和处理。对照小区地上植物和凋落物保持原状;根系生物量 0.37 kg/m^2,小于 2 mm 的根系重量占总根系重量的 60.4%。处理小区采用根移除法对 30 cm 深度土壤内的根系进行移除,小区四周用油毡与区外隔离以阻止区外的根系向区内生长。处理后把原土壤放回原处,适当压实,让其自然恢复,1 a 后进行测定。

对照和处理小区的土壤呼吸速率用 LI-6400 光合作用系统连接 6400-09 标准气室测定(LI-COR, Environmental Division, Lincoln, NE, USA)。每年测定前在每个处理和对照小区随机各放置 6 个 PVC 环测定土壤呼吸,测定期间保持 PVC 环位置不变。测定从 2007 年 3 月至 2008 年 12 月进行,每月测定 1～3 次不等。土壤呼吸速率的测定时间为上午 10:00 点左右。测定土壤呼吸的同时,用 LI-6400 光合作用系统的温度探针同步测定 10 cm 深度的土壤温度。0—10 cm深度的土壤重量含水量用土钻法测定,3 个重复。温度和土壤水分在 PVC 环附近测定。测定方法详见参考文献[6]。根系呼吸速率等于对照小区的土壤呼吸平均值和处理小区的土壤呼吸平均值的差[7]。

1.2.2 *数据处理* 采用指数方程 $R=a\ e^{bT}$ 分析根系呼吸与土壤温度的关系,利用 $Q_{10}=e^{10\,b}$ 计算根系呼吸的温度敏感性指数;用线性回归 $R=aW+b$ 分析根系呼吸与土壤水分的关系;用双变量方程 $R=ae^{bT}\,W^{c}$ 分析土壤温度和土壤湿度对根系呼吸的共同影响。其中:R,T,W 分别为根系呼吸、土壤温度、土壤水分;a,b 和 c 为模型待定参数。

用 t 检验分析 2 a 土壤温度、土壤水分和土壤呼吸的年际差异。

研究表明,9:00—11:00 的测定值可以代表日平均值[8],因此我们用测定值代替 24 h 的土壤呼吸平均值。由于各月的测定次数不同,首先计算根系呼吸的月平均值,用该值乘以对应月份的天数,即可得出月根系呼吸总量,相加即为年根系呼吸总量。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤水分和根系呼吸的季节变化

2.1.1 *季节变化* 土壤温度具有明显的季节变化(图 1a):冬春季较低,夏秋季较高。一年中,10 cm 深度的温度变幅从 −2 ℃以下到 20 ℃以上。t 检验表明,土壤温度的年际间差异不显著($p>0.05$)。受降水量及其分布的影响,0—10 cm 深度的土壤水分表现出明显的“干—湿—干”交替特点(图 1b)。2 个测定年土壤水分的变化既有共同特点,也有明显差异。春末夏初土壤水分具有明显的下降趋势,土壤水分下降的持续时间和程度取决于夏季降水到来的时间和降水强度。2007 年由于 2006 年冬季和年初、秋季的降水量较大,年降水分布接近年平均水平,其季节变化基本为“W”型;而 2008 年由于 2007 年高土壤水分和春季、初夏降水的影响,6 月中旬之前土壤水分一直维持在较高水平,之后由于夏季的降水较少且分布均匀,夏秋季节土壤水分也没有明显升高,整个测定年土壤水分呈逐渐降低的趋势。

受土壤温度和土壤水分的影响,根系呼吸也表现

出明显的季节变化特点(图 1c)。最低值出现在测定初和末期,在 0.1 μmol/(m² · s)左右。根系呼吸最大值 2007 年出现在 8 月份,2008 年在 7 月份。最大值出现的时间受土壤水分的控制,夏季降雨后根系呼吸明显增加。生长季的根系呼吸平均值(1.94±0.81)μmol/(m² · s)远大于非生长季(0.31±0.38)μmol/(m² · s)。2 个测定年根系呼吸的平均值差异不显著($p>0.05$),总平均值为(1.25 ±1.05)μmol/(m² · s)。

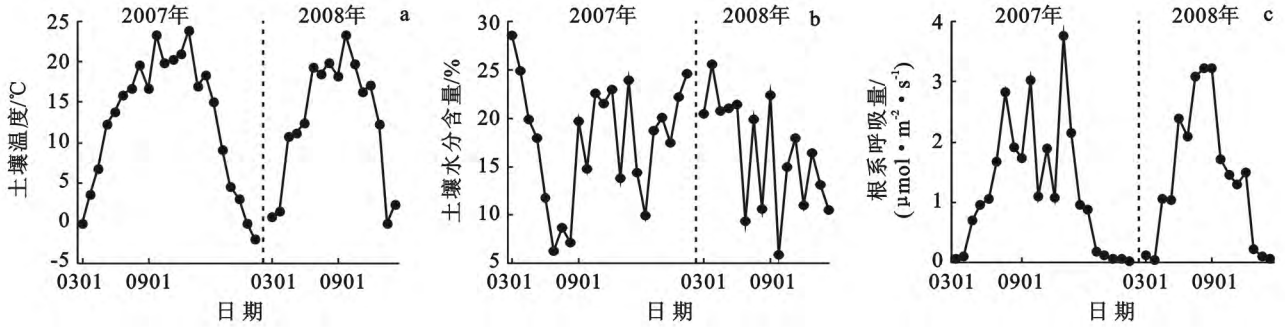


图 1　弃耕地土壤温度(a)、土壤水分含量(b)和根系呼吸量(c)的季节变化

2.1.2　根系呼吸量　表 1 为 2 个测定年各月及年根系呼吸量。从表 1 中可以看出,月根系呼吸量具有明显的季节变化。3,10—12 月月呼吸量较低,4—9 月月呼吸量较高,根系呼吸的最大值出现在 2007 年 8 月和 2008 年 7 月。

3—12 月的根系呼吸 C 量为 329.5,392.5 g/m²,生长季(5—9 月)的总呼吸 C 量分别为 291,345.7 g/m²。对 2007,2008 年根系呼吸月呼吸量的配对 t 检验表明,两年根系呼吸的月总量差异不显著($p=0.21$)。

表 1　2007,2008 年各月根系呼吸 C 量　　g/m²

年份	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计	5—9 月
2007	2.5	25.6	43.9	67.1	66.5	72.1	41.4	6.0	3.0	1.4	329.5	291.0
2008	2.6	32.4	72.3	95.9	83.0	51.2	43.4	7.1	2.9	1.8	392.5	345.7

2.2　根系呼吸与环境因子的关系

根系呼吸速率与土壤温度的关系均为极显著(表 2),土壤温度可以解释根系呼吸速率季节变化的 79%～88%;而 2007 年根系呼吸速率与土壤水分的关系显著,2008 年不显著。

根系呼吸速率与土壤温度和土壤水分的双因素关系模型 $R=ae^{bT}W^c$ 分析表明,两个年份的双因素关系模型均好于单因子模型(表 2),但 R^2 值提高幅度不大,表明本样地土壤温度是影响根系呼吸速率的主导因子。10 cm 深度根系呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 值 2007 和 2008 年分别为 5.92 和 5.69。

2.3　根系呼吸占土壤总呼吸的比例

根系呼吸占土壤呼吸的比例季节变化较为明显(图 2)。在 3 月份较低,2007 和 2008 年分别为 5.07%和 5.83%;4 月随着气温回升,根系呼吸比例快速上升,一直到 9 月之前,其值在 24%～54%,10 月以后气温减低,根系呼吸比例也随之减低。2007,2008 年 3—12 月的平均值分别为 24.9%和 30.9%,2 a的平均值为 27.9%;生长季 5—9 月的平均值分别为 33.5%,42.1%,2 a 的平均值为 37.8%。

表 2　弃耕地根系呼吸速率与土壤温度和土壤水分关系模型参数

年份	n	模型参数									
		$R=ae^{bT}$			$R=aW+b$			$R=ae^{bT}W^c$			
		a	b	R^2	a	b	R^2	a	b	c	R^2
2007	22	0.061	0.178	0.88**	−0.084	2.699	0.24*	0.273	0.167	−0.485	0.89**
2008	16	0.076	0.174	0.79**	0.002	1.306	0.00	0.004	0.199	0.961	0.85**
2007—2008	38	0.067	0.176	0.84**	−0.053	2.161	0.09	0.053	0.178	0.077	0.84**

注:n 指观测次数;R,T,W 分别代表根系呼吸、土壤温度、土壤水分;a,b 和 c 为模型拟合参数。** 表示回归方程极显著($p<0.01$),* 表示回归方程显著($p<0.05$)。

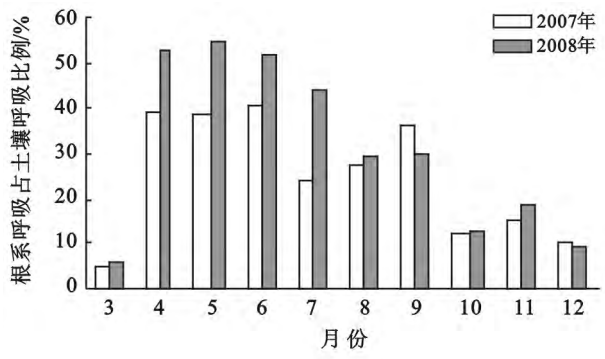


图 2 根系呼吸占土壤总呼吸比例的季节变化

3 讨 论

土壤呼吸的组分区分是定量评估土壤碳平衡的重要基础[8-9]，且植物根系在陆地碳和养分循环中发挥着重要作用[10]。在不同的研究中，对草地生态系统根系呼吸贡献量的估算值变化很大[11-12]，主要取决于植被类型和研究地点的环境条件等因素。根系呼吸贡献量的可变性一方面反映了不同生态系统类型之间的差异，同时可能与不同研究所使用的方法不同有关。本研究中，2007 和 2008 年 3—12 月根系呼吸比例的变化范围为 5%～55%，平均值分别为 24.9%和 30.9%；春末夏初根系呼吸所占比重最大，与此间根系生长发育较快、根系生物量大有关。生长季 5—9 月的平均值分别为 33.5%和 42.1%，在报道范围内。如通过去除根系法测得根系呼吸占土壤总呼吸的比例在澳大利亚季节性干旱热带稀树草原群落为 40%[13]；澳大利亚多年生人工草地为 53%[14]；Kucera 等[15]在 Texas 高草草原的比例为 40%。刘立新等[4]对内蒙古温带半干旱草原研究得到的比例最大值为 61.47%，最小值为 19.9%，平均值为 35.7%。李凌浩等[11]对锡林河流域一个放牧群落的研究表明：在不同月份，根系呼吸量占土壤呼吸总量的比例在 15%～37%。Raich 等[2]估算的草原群落根系呼吸量占土壤总呼吸量的比例在 17%～40%。

本研究中根系呼吸速率具有明显的季节变化，变化趋势与土壤温度的变化趋势基本相同，与其他学者的研究结果一致[11,16]。根系呼吸速率最大值出现的时间不尽相同，与各研究样地土壤温度、土壤湿度配置状况和草地生长节律差异等有关。根系呼吸速率最大值出现在夏季，与该期土壤温度和湿度条件适宜，根系生长代谢活动旺盛有关，同时与植物光合作用在生长季前期较大有关；冬季和春季根系呼吸速率较低，可能与根系活动受低温限制有关。

2007 和 2008 年根系呼吸速率与土壤温度呈极显著正相关，土壤温度可以解释根系呼吸速率季节变化的 79%～88%。与土壤温度相比，根系呼吸速率与土壤水分之间的相关关系较差，表明研究地的土壤呼吸主要受土壤温度控制，与姜丽芬等[16]对东北地区落叶松人工林的根系呼吸的研究结果相一致。增加土壤水分因子后回归方程解释土壤呼吸变化的比例增加说明土壤水分对根系呼吸速率也有一定影响[17-18]。土壤水分对根系呼吸的影响主要出现在夏季，土壤干旱可以严重抑制土壤呼吸，从夏季个别测定日土壤呼吸的低值得以佐证(图 1)；土壤水分对根系呼吸的影响主要在生长季，非生长季的作用较小，表明在温度较低的情况下，高土壤水分含量并非一定都能促进根系的呼吸，这与 Keith 等[19]的研究结果相一致。根系呼吸占土壤总呼吸的比例在 4—7 月较大，与植物的物候期相一致。因为这 4 个月是植物的生长旺季，也是植物光合作用最强的时期，因此也是根系呼吸最大的时期。

不同年份根系呼吸与土壤温度和土壤水分的双变量关系模型的拟合结果均好于仅考虑土壤温度或土壤水分的单因子模型。本研究中土壤温度和土壤水分共同解释了弃耕地根系呼吸速率季节变化的 81%～89%，这与陈光水等[7]报道的土壤温度和土壤水分共同解释格氏栲天然林和人工林根系呼吸速率季节变化的 81%～90%结果相似。

4 结 论

(1) 弃耕地的根系呼吸速率具有明显的季节变化，与土壤温度的变化趋势相一致，夏季高冬春季低。

(2) 2007 和 2008 年 3—12 月的根系呼吸总 C 量分别为 329.5 和 392.5 g/m^2，生长季 5—9 月的总 C 呼吸量分别为 291 和 345.7 g/m^2。

(3) 土壤温度是影响根系呼吸速率的主导因子，可以解释根系呼吸速率季节变化的 79%～88%，土壤水分对根系呼吸的影响较小。包括土壤温度和土壤水分两个变量的双因素模型可以解释根系呼吸季节变化比例增到的 81%～89%。

(4) 根系呼吸占土壤总呼吸的比例具有明显的季节变化，2007 和 2008 年 3—12 月根系呼吸比例的变化范围为 5%～55%，平均值分别为 24.9%和 30.9%，生长季的平均值分别为 33.5%和 42.1%。

[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 B, 1992, 44(2): 81-99.

[2] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlation and controls [J]. Biogeochemistry,

2000,48(1):71-90.

[3] 程慎玉,张宪洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. 地球科学进展,2003,8(4):597-602.

[4] 刘立新,董云社,齐玉春,等. 应用根去除法对内蒙古温带半干旱草原根系呼吸与土壤总呼吸的区分研究[J]. 环境科学,2007,28(4):689-694.

[5] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):115-146.

[6] Li Hongjian, Yan Junxia, Yue Xiaofeng, et al. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008,148(3):490-503.

[7] 陈光水,杨玉盛,王小国,等. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J]. 生态学报,2005,25(8):1941-1947.

[8] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confound factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest[J]. Global Change Biology, 1998,4(2):217-227.

[9] Bond-lamberty B, Wang Chuankuan, Gower S T. Contribution of root respiration to soil surface CO_2 flux in a boreal black spruce chronosequence[J]. Tree Physiology, 2004,24(12):1387-1395.

[10] Hendricks J J, Nadelhoffer K J, Aber J D. Assessing the role of fine roots in carbon and nutrient cycling[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1993,8(5):174-178.

[11] 李凌浩,韩兴国,王其兵,等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J]. 植物生态学报,2002,26(1):29-32.

[12] Wang Wei, Ohse K, Liu Jianjun, et al. Contribution of root respiration to soil respiration in a C_3/C_4 mixed grassland[J]. Journal of Biosciences, 2005,30(4):507-514.

[13] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near Townsville, North-Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 1990,28(5):737-745.

[14] Robertson F A, Myers R J K, Saffigna P G. Respiration from soil and litter in a sown perennial grass pasture[J]. Australian Journal of Soil Research, 1995,33(1):167-178.

[15] Kucera C L, Kirkham D R. Soil respiration studies in tallgrass prairie in missouri[J]. Ecology, 1971,52(5):912-915.

[16] 姜丽芬,石福臣,王化田,等. 东北地区落叶松人工林的根系呼吸[J]. 植物生理学通讯,2004,40(1):27-30.

[17] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998,396(6711):570-572.

[18] 严俊霞,李洪建,尤龙凤. 玉米农田土壤呼吸与环境因子的关系研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(3):183-189.

[19] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in Eucalyptus pauciflora forest [J]. Plant and Soil, 1997,190(1):127-141.

(上接第 28 页)

[5] 高芳芳,巫锡勇,邓睿. 昔格达地层岩土特性对溯源侵蚀的影响[J]. 地质灾害与环境保护 2009,20(3):80-84.

[6] 谯春丽,何昌荣,张文举. 昔格达土的动力特性研究[J]. 四川水利,2003(5):33-36.

[7] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报,1963(2):1-12.

[8] Osman A M, Thome C R. Riverbank stability analysis (I): theory[J]. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1988,114(2):134-150.

[9] 王广谦,薛海,李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(4):335-344.

[10] 中华人民共和国. 建筑边坡工程技术规范 GB50330—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[11] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated 50115 [J]. Canadian Geotechnical, 1978,15(2):313-321.

[12] 卢肇钧. 粘性土抗剪强度研究的现状与展望[J]. 土木工程学报,1999,32(4):3-9.

[13] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的强度特征[J]. 岩土力学工程学报,2001,19(2):56-61.

[14] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度[J]. 水利学报,2001(7):79-83.

[15] 朱宝龙,郭进军,文华,等. 土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011:211-213.