

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2017.03.008

# 植被类型和降雨量对沟谷地土壤水分和温度空间分布的影响

徐明<sup>1,2</sup>, 张健<sup>1,2,3\*</sup>, 刘国彬<sup>1\*</sup>, 董继鑫<sup>3</sup>, 石露<sup>2</sup>, 郑明清<sup>4</sup>

(1. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
2. 贵州大学生命科学学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100086;  
4. 环境保护部信息中心, 北京 100029)

**摘要:**土壤水分和温度作为反映土壤环境的重要指标,对土壤中各种生物化学过程具有着重要的影响。本文通过对不同植被恢复模式和降雨量梯度沟谷地土壤水分和温度 0~500 cm 剖面分布的研究,结果表明:不同植被恢复模式间沟谷地的土壤水分和温度存在着显著差异( $P < 0.01$ ),土壤水分含量表现为草地沟 > 灌木沟 > 乔木沟,土壤温度表现为乔木沟 > 草本沟 > 灌木沟;这表明不同生活型植物的生物学特性可以对植物群落土壤的水分和温度产生分异影响。不同降雨梯度地区间沟谷地的土壤水分和温度也存在显著差异( $P < 0.01$ ),土壤水分含量与降雨量呈正相关,土壤水量表现为西河口 > 沿河湾 > 镰刀湾;土壤温度表现为镰刀湾 > 西河口 > 沿河湾;这表明降雨量差异可以对沟谷地的土壤水分和温度产生显著影响。因此,在沟谷地植被恢复过程中,需要综合考虑地区降雨条件和植被类型的配置,这将有助于促进该地区生态环境的改善与提升。

**关键词:**刺槐;柠条;天然草地;坡位;黄土丘陵区

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2017)03-0499-09

## Effects of Vegetation Types and Rainfall on Soil Water Content and Temperature in the Gully Areas

XU Ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2,3\*</sup>, LIU Guo-bin<sup>1\*</sup>, DONG Ji-xin<sup>3</sup>, SHI Lu<sup>2</sup>, ZHENG Ming-qing<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China;  
2. College of Life Science, Guizhou University, Guiyang, Guizhou Province 550025, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Science, Beijing 100086, China; 4. Information Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100086, China)

**Abstract:** Soil moisture and temperature are important indicators of soil environment, which have significant impact on a variety of biochemical processes in soil. Through investigating soil moisture and temperature of 0~500 cm profile and spatial distribution of different vegetation restoration patterns and rainfall gradient gully, the main results and conclusions were as follows: soil moisture and temperature among different vegetation restoration pattern gullies had significant differences ( $P < 0.01$ ). Soil water content (SWC) expressed as grass gully > shrub gully > arbor gully, and soil temperature expressed as arbor gully > grass gully > shrub gully. Results showed that different vegetation restoration patterns were differentiation in gully SWC and temperature, which was closely related to the biological characteristics of the dominant species. Soil moisture and temperature among different rainfall gradient gullies had significant differences ( $P < 0.01$ ). Gully SWC and precipitation had a positively correlation. Gully SWC showed as Xihekou > Yanhewan > Liandaowan, and gully soil temperature expressed as Liandaowan > Xihekou > Yanhewan. The results showed that rainfall differences could have a significant impact on the gully soil moisture and temperature. Therefore, during the process of gully vegetation restoration, local rainfall con-

收稿日期:2015-07-07;修回日期:2016-02-15

基金项目:科技基础性工作专项(2014FY210100);国家科技支撑计划(2015BAC01B03);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放研究基金资助项目(A314021402-1715);国家自然科学基金(31660150)资助

作者简介:徐明(1982-),女,安徽天长人,博士,讲师,主要从事流域生态系统恢复研究,E-mail: mingxu566@163.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail: zhangjian12102@163.com; gblu@ms.iswc.ac.cn

dition and spatial configuration of vegetation types should be concerned for the improvement of ecological environment.

**Key words:** *Robinia pseudoacacia*; *Caragana korshinskii*; Natural grassland; Slope position; The hilly Loess Plateau

土壤水分和温度是反映土壤环境的重要指标,对土壤中各种生物化学过程和非生命的化学过程都具有重要的影响。其中,土壤水分作为黄土高原植物生长发育的主要环境限制因子,对土壤侵蚀、溶质迁移和土壤-大气之间相互作用等水文学过程以及土壤形成过程有着重要的影响<sup>[1]</sup>。土壤温度是重要的土壤物理性质,可以影响植物的生长、发育和土壤的形成,如温度条件可决定种子是否萌发,或影响环境条件中的其他因子(微生物活性、有机质分解和水分运动等),从而间接影响植物的生长发育<sup>[2]</sup>。土壤水分和温度之间也存在着相互作用关系,如水分作为能量传递的介质,可以影响温度的变化;而土壤温度的变化同样影响水分的形态和运动的速率。由此可见,土壤水分和温度影响着土壤中很多重要的物理、化学以及生物化学过程,获取完整而准确的土壤水分和温度时空分布数据在全球气候变化、环境过程模拟、元素地球化学循环、土壤理化性质演变研究等方面都非常必要<sup>[3-4]</sup>。因此,深入了解土壤水分和温度的分布及变化规律,将有助于提高我们对土壤中各种生态过程的认识。

黄土丘陵区是我国西部退耕还林还草及生态环境建设的重点区域<sup>[5]</sup>。黄土丘陵区的地貌单元可划分为沟间地(或坡面,包括塬面和梁峁坡)和沟谷地(或沟道,包括沟坡和沟床/沟底)两种主要形态<sup>[6]</sup>。沟谷地地貌在世界范围内普遍存在,是流域泥沙的主要来源,也是黄土丘陵区生态恢复的重点关注地貌类型。对沟谷地植被的恢复和重建已经开展了大

量的实践工作<sup>[7]</sup>。然而,由于沟谷地坡陡沟深,仅有少量沟谷地土壤水分的相关研究成果<sup>[8-11]</sup>,而且有关黄土剖面土壤温度分布特征的研究还鲜有报道。因此,本试验选取代表性植被恢复模式和降雨量差异地区沟谷地土壤的水分和温度的空间分布进行调查,以期为指导该区沟谷地地貌单元的植被恢复与重建工作提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕北安塞县(E 108°51'44"~109°26'18",N 36°22'40"~37°19'31"),该区地形破碎,沟壑纵横,属典型的黄土高原丘陵沟壑区。其中,梁峁坡地占全县总土地面积的 44.2%,沟谷地占 36.4%<sup>[12]</sup>。气候属暖温带半干旱半湿润气候,年均降雨量为 500 mm 左右,且 70%左右降雨多分布于 6—9 月,年平均蒸发量 1 000 mm,无霜期 160~180 d 左右,年日照时数 2 352~2 573 h,≥10℃积温 2 866℃,年均气温 8.9℃。土壤为黄土素母质上发育的黄绵土,土壤质地属轻壤,田间持水量 18.4%<sup>[13]</sup>,凋萎湿度 4%~5%<sup>[14]</sup>,毛管断裂水含量 10.0%。植被分区属于暖温带森林草原过渡带,天然森林已破坏,现有植被主要以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)等为主的人工林;以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的人工灌丛。

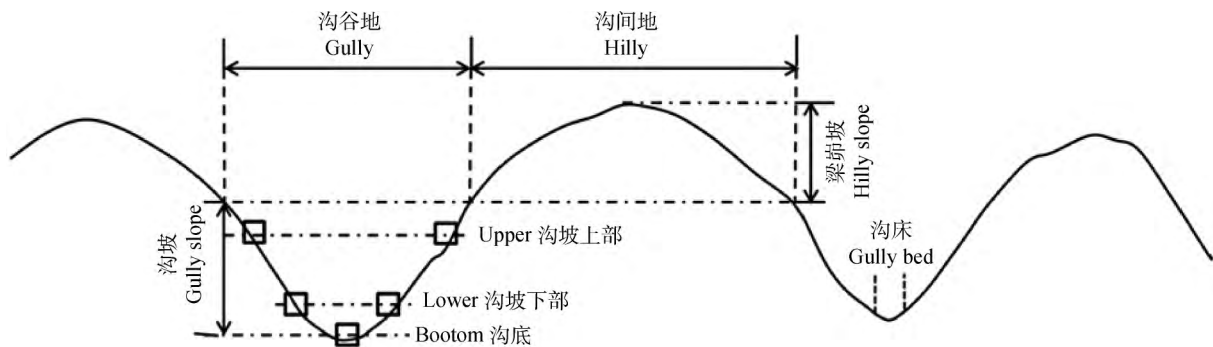


图 1 样方设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling quadrats (squares) in each study site along gully slope

注:对照为梁坡中部

Note: control plot sites at the middle of slope

表 1 样地基本描述  
Table 1 General conditions of experimental field

样地 Sites	地点 Locations	经(E)纬(N)坐标 Longitude (E) and Latitude (N)	坡位 Slope position	坡向 Slope Aspect	坡度 Slope Degree /o	海拔 Elevation /m	植被类型 Vegetation types
沟谷地							
G-Rp	真武洞镇	109°18'22"E, 36°51'17"N	每条沟道分西坡	S→N	25~52	1100~1300	刺槐林
G-Ck	真武洞镇	109°18'55"E, 36°51'25"N	上部、西坡下部、沟底、	S→N	25~59	1090~1250	柠条灌丛
G-Ng	沿河湾镇	109°15'38"E, 36°45'4"N	东坡下部和东坡上部、	S→N	20~45	1080~1275	铁杆蒿草地
G-XHK	西河口乡	109°00'52"E, 36°41'58"N	共 5 个坡位	S→N	20~45	1290~1371	铁杆蒿草地
G-LDW	镰刀湾乡	108°58'8"E, 37°13'24"N		S→N	25~65	1207~1370	铁杆蒿草地
坡面							
S-Rp	沿河湾镇	109°16'01"E, 36°45'43"N	梁坡中	ES	26	1241	刺槐林
S-Ck	沿河湾镇	109°16'02"E, 36°45'38"N	梁坡中	ES	27	1235	柠条灌丛
S-Ng	真武洞镇	109°18'54"E, 36°51'20"N	梁坡中	ES	20	1256	铁杆蒿草地
S-XHK	西河口乡	109°00'53"E, 36°41'57"N	梁坡中	N	23	1280	铁杆蒿草地
S-LDW	镰刀湾乡	108°58'38"E, 37°13'24"N	梁坡中	WS218	30	1396	铁杆蒿草地

1.2 样地选择与土壤采集

研究主要考察不同植被恢复模式和不同降雨量对沟谷地深层土壤水分的影响。研究共涉及 3 种不同植被恢复模式沟谷地, 分别位于土壤和气候条件较为一致的(县城附近)墩滩山流域和(沿河湾镇)纸坊沟流域; 选取植被代表了植物的 3 种生活型(表 1): 乔木、灌木和草本, 分别为人工乔木-刺槐林沟谷地(G-Rp)、人工灌木-柠条林沟谷地(G-Ck)和自然恢复-天然草地沟谷地(G-Ng), 样地的相关植被和土壤属性可详见文献<sup>[15-17]</sup>。同时, 依据安塞县空间上由北到南存在的天然降雨量梯度(变化范围为 400~550 mm), 选取安塞县境内年均降雨量不同的 3 个天然草地(铁杆蒿群落)沟谷地(表 1), 分别位于镰刀湾乡(G-LDW, 年均降雨量约为 400 mm)、沿河湾镇(G-Ng, 年均降雨量约为 500 mm)、和西河口乡(G-XHK, 年均降雨量约为 550 mm)。同时为了更好地反映出地区水分状况, 分别在每个沟谷地样地周围对应选取一个同样植被类型的坡面样地作为对照, 其中对照坡面样地主要涉及人工乔木-刺槐林(S-Rp)、人工灌木-柠条林(S-Ck)、天然草地(S-Ng)、西河口坡面天然草地(S-XHK)和镰刀湾坡面天然草地(S-LDW)。

所选沟谷地均为南北沟, 坡面对照样地的坡向为东坡。每条沟道横截面上设置 5 个不同坡位的采样点, 分别为: 西坡上部(W-upper)、西坡下部(W-lower)、沟坡底部(Bottom)、东坡下部(E-lower)和东坡上部(E-upper)。坡面对照样地选取在东坡中部(图 1)。采用“土钻法”取样测定样地土壤水分。取样深度为 500 cm, 每隔 20 cm 取样, 105 °C 下烘干

至恒重, 用精度为 0.01 g 的电子天平称重, 计算土壤含水量。应用红外线测温仪 THI-440NH(日本 TASC0 温度计)测定土壤温度, 仪器 0.8 秒内可读数, 物体温度为 0~199 °C 时测量精度为 ±1 °C 以内, 因此, 应用该仪器测量刚钻出的土壤温度, 可较为精确的反映深层土壤温度的实际情况。

1.3 土壤有效水计算

$$(1) \text{ 土壤储水量 } S_{SWC} = \sum_{i=1}^n 0.1 \times BD_i \times \theta_i \times H$$

$$(2) \text{ 土壤有效持水量 } S_{EWS} = \sum_{i=1}^n 0.1 \times BD_i \times (\theta_i - \theta_{WH}) \times H$$

$$(3) \text{ 土壤潜在储水量 } S_{FC} = \sum_{i=1}^n 0.1 \times BD_i \times \theta_{FC} \times H$$

$$(4) \text{ 土壤水分亏缺量 } S_{DSW} = \sum_{i=1}^n 0.1 \times BD_i \times H \times (\theta_{FC} - \theta_i)$$

$$(5) \text{ 土壤水分亏缺率 } R_{DSW}(\%) = S_{DSW} / S_{FC} \times 100\%$$

式中,  $S_{SWC}$  表示土壤储水量(Storage of soil water content);  $S_{FC}$  表示土壤潜在储水量(Potential storage of soil water content);  $S_{DSW}$  表示土壤水分亏缺量(Soil water deficit);  $R_{DSW}(\%)$  为土壤水分亏缺率(Ratio of soil water deficit);  $BD_i$  表示第 i 层土壤容重(Bulk density);  $\theta_i$  表示第 i 层土壤含水量(Soil water content);  $H$  表示土层厚度(Thickness of soil

layer);  $\theta_{WH}$  表示萎蔫湿度 (Wilting humidity, 取 4.5%);  $\theta_{FC}$  表示田间持水量 (Field capacity, 取 18.4%)。有效水含量为土壤实际水含量至凋萎系数之间的含水量, 亏缺量为田间持水量与土壤实际水含量之间的含水量。

#### 1.4 数据统计分析

采用变异系数 ( $CV = \text{标准偏差} / \text{平均值} \times 100\%$ ) 反映沟谷地剖面不同深度土壤水分和温度的变异程度, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (LSD) 方法分析不同处理之间的差异。采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行数据整理与处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 沟谷地剖面土壤水分含量统计分析

剖面土壤水分变异系数的差异是剖面土壤水分差异大、变化较为剧烈的一种表征, 也反映出土壤水分含量受植被或者气候条件影响的程度。通过对不同沟谷地剖面土壤水分的平均值和变异系数进行统计分析 (表 2)。结果表明: 土壤水分变异系数变化程度为刺槐沟 > 柠条沟 > 草地沟; 沟谷地土壤水分的变异程度与植被生活型耗水能力一致。

表 2 不同植被类型和降雨量条件下沟谷地剖面土壤水含量的平均值和变异系数

Table 2 Mean value and coefficient variation of soil moisture in different vegetation types and precipitation gullies

沟道 Gully		土层 Soil layers /cm					
		0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	0~500
G-Rp	Mean %	12.55 <sup>a</sup>	13.94 <sup>a</sup>	13.64 <sup>a</sup>	12.80 <sup>a</sup>	9.21 <sup>b</sup>	12.43
	CV %	33.95	33.18	28.37	26.85	33.36	33.70
G-Ck	Mean %	15.58 <sup>a</sup>	15.81 <sup>a</sup>	14.09 <sup>a</sup>	14.80 <sup>a</sup>	14.19 <sup>a</sup>	14.89
	CV %	21.49	16.31	18.63	20.96	32.44	22.52
G-Ng	Mean %	14.36 <sup>a</sup>	16.20 <sup>a</sup>	14.55 <sup>a</sup>	15.60 <sup>a</sup>	15.17 <sup>a</sup>	15.18
	CV %	20.96	18.12	15.71	15.30	11.87	16.96
G-XHK	Mean %	11.34 <sup>a</sup>	15.86 <sup>b</sup>	16.01 <sup>b</sup>	16.62 <sup>b</sup>	17.74 <sup>b</sup>	15.51
	CV %	40.74	14.27	9.22	13.33	18.62	23.63
G-LDW	Mean %	5.89 <sup>a</sup>	9.84 <sup>b</sup>	9.47 <sup>b</sup>	8.98 <sup>b</sup>	7.88 <sup>b</sup>	8.42
	CV %	42.79	20.81	32.71	41.08	35.02	37.59

注: 不同小写字母表示同一沟谷地不同土层间土壤水分含量差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level among soil moisture in different soil layers at the same gully

不同降雨量地区间沟谷地 0~500 cm 剖面的土壤含水量空间分布存在明显差异 (图 2c, d, e)。其中, 西河口和沿河湾沟谷地土壤含水量变化趋势较

降雨量差异对沟谷地土壤水分含量产生重要的影响。本研究统计了 3 条不同降雨量条件下沟谷地不同土层土壤水分的平均值和变异系数 (表 2)。不同降雨量地区沟谷地 5 m 剖面土壤水分平均值表现为西河口 > 沿河湾 > 镰刀湾, 土壤含水量变异系数表现为镰刀湾 > 沿河湾 > 西河口。结果表明, 400 mm 降雨量的镰刀湾沟谷地土壤水分含量明显偏低, 且沟谷地剖面土壤水分的变异系数最大, 波动最剧烈。

### 2.2 沟谷地土壤水分剖面分布特征

不同植被恢复模式间沟谷地 0~500 cm 剖面土壤含水量空间分布存在明显差异 (图 2a, b, c)。其中, 刺槐沟不同坡位间土壤水分的变化差异最大, 与坡面刺槐林土壤水分相比, 只有沟底水分含量高于对照, 并且在大于 4 m 深的土壤水分出现亏缺, 开始趋于土壤干化 (表 2); 天然草地沟坡位间土壤水分变化差异最小, 各坡位土壤水分含量均高于对照坡面土, 且土壤水分含量随土层加深呈现逐渐增加趋势; 柠条沟坡位间土壤水分的变化差异介于刺槐沟和草地沟之间。总体上, 沟道内土壤水分空间分布表现出随着地势的下降, 土壤水分含量升高的趋势; 但不同植被类型间沟谷地土壤含水量存在明显差异, 表现为刺槐沟 > 柠条沟 > 草地沟。

为一致 (表 4), 且沟谷地各坡位的土壤含水量均高于对照坡面草地。而镰刀湾沟谷地土壤水分空间分布情况与前两个降雨量地区相比, 表现出明显差异。

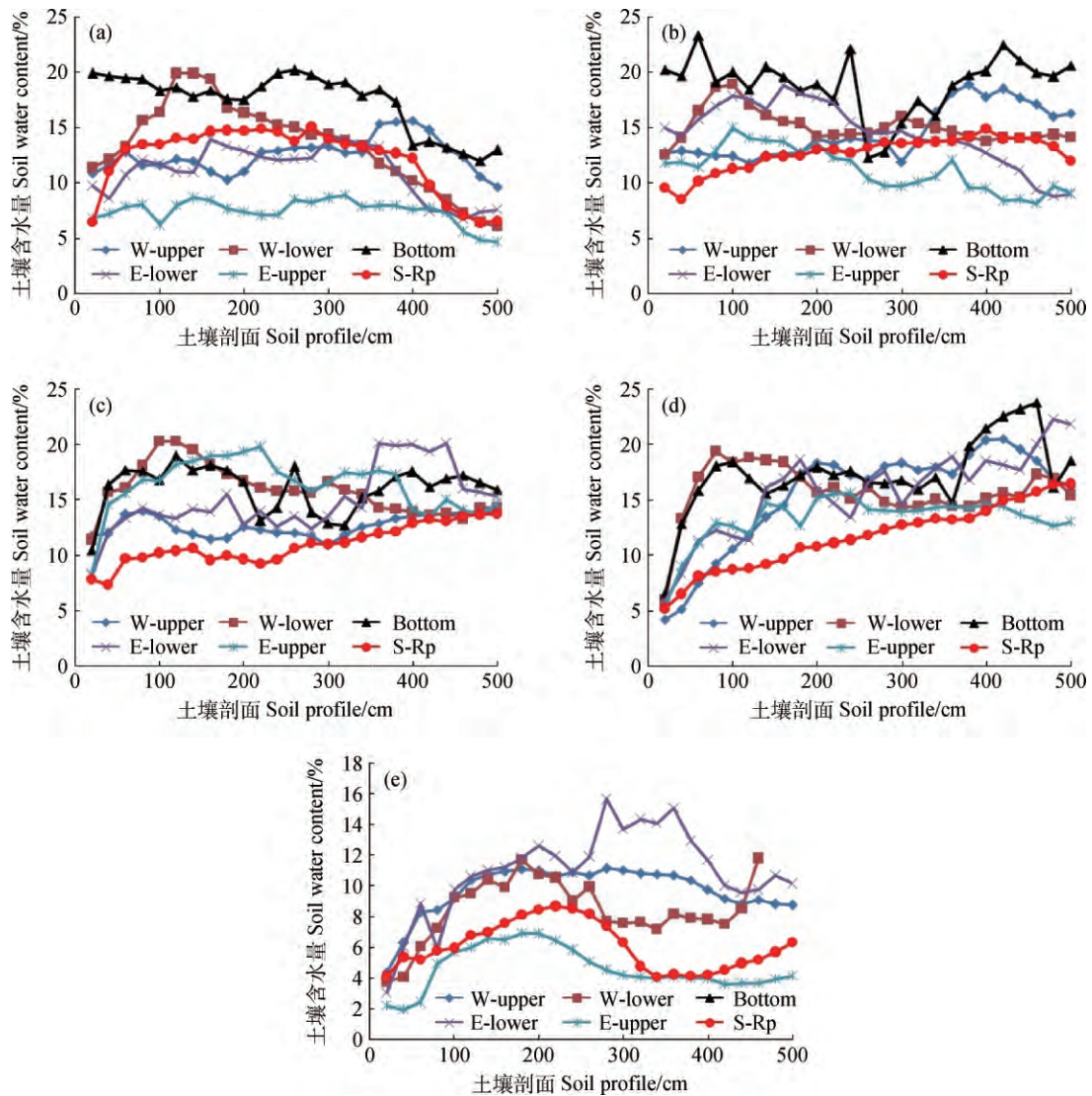


图 2 不同植被恢复模式和不同降雨量地区沟谷地坡位间 0~500 cm 剖面土壤含水量  
 Fig. 2 Soil water content along 0~500 cm profile at different gully positions associated with different vegetation restoration patterns and different precipitation regions

注: (a)刺槐沟谷地; (b)柠条沟谷地; (c)天然草地(沿河湾)沟谷地; (d)西河口沟谷地; (e)镰刀湾沟谷地

Note: (a) *R. pseudoacacia* gully; (b) *C. korshinskii* gully; (c) Natural grassland (Yanhewan) gully; (d) Xihekou gully; (e) Liandaowan gully

### 2.3 沟谷地土壤储水量剖面分布特征

不同植被恢复模式沟谷地坡位间的土壤储水量分布存在明显差异(图 3a, b, c)。总体上,刺槐沟的 0~500 cm 土壤储水量呈先增加后降低的“凸面型”变化趋势,而且刺槐沟只有沟底和沟坡下部的土壤储水量高于对照;尽管外观上刺槐沟的植被长势良好,但土壤水分还是呈亏缺趋势;柠条沟与草地沟在 0~500 cm 深度土壤储水量呈“凹面型”变化趋势、幅度较小,且总体高于对照。

不同降雨量地区沟谷地不同坡位上 0~500 cm 剖面土壤储水量的空间分布存在一定差异(图 3c, d, e)。总体上,西河口和沿河湾沟谷地土壤储水量

变化趋势较为一致;其中,沿河湾沟谷地各层土壤储水量变异不大,随土层加深西河口沟谷地土壤储水量有逐渐增加趋势(图 3d)。但随地区降雨量下降到 400 mm,镰刀湾沟谷地剖面土壤储水量有明显降低趋势(图 3e)。

### 2.4 沟谷地剖面土壤温度统计分析

沟谷地 0~500 cm 剖面上土壤温度表现为先下降后缓慢上升的变化趋势,总体表现为:土壤上层(0~200 cm)温度受到大气环境温度影响较大且夏季温度较高,0~60 cm 土壤温度降幅最大,200~500 cm 土壤温度变化幅度较小(表 3)。不同生活型植物群



落下,沟谷地 0~500 cm 剖面土壤温度表现为乔木 >

草本 > 灌木,变异系数呈现出草本 > 灌木 > 乔木。

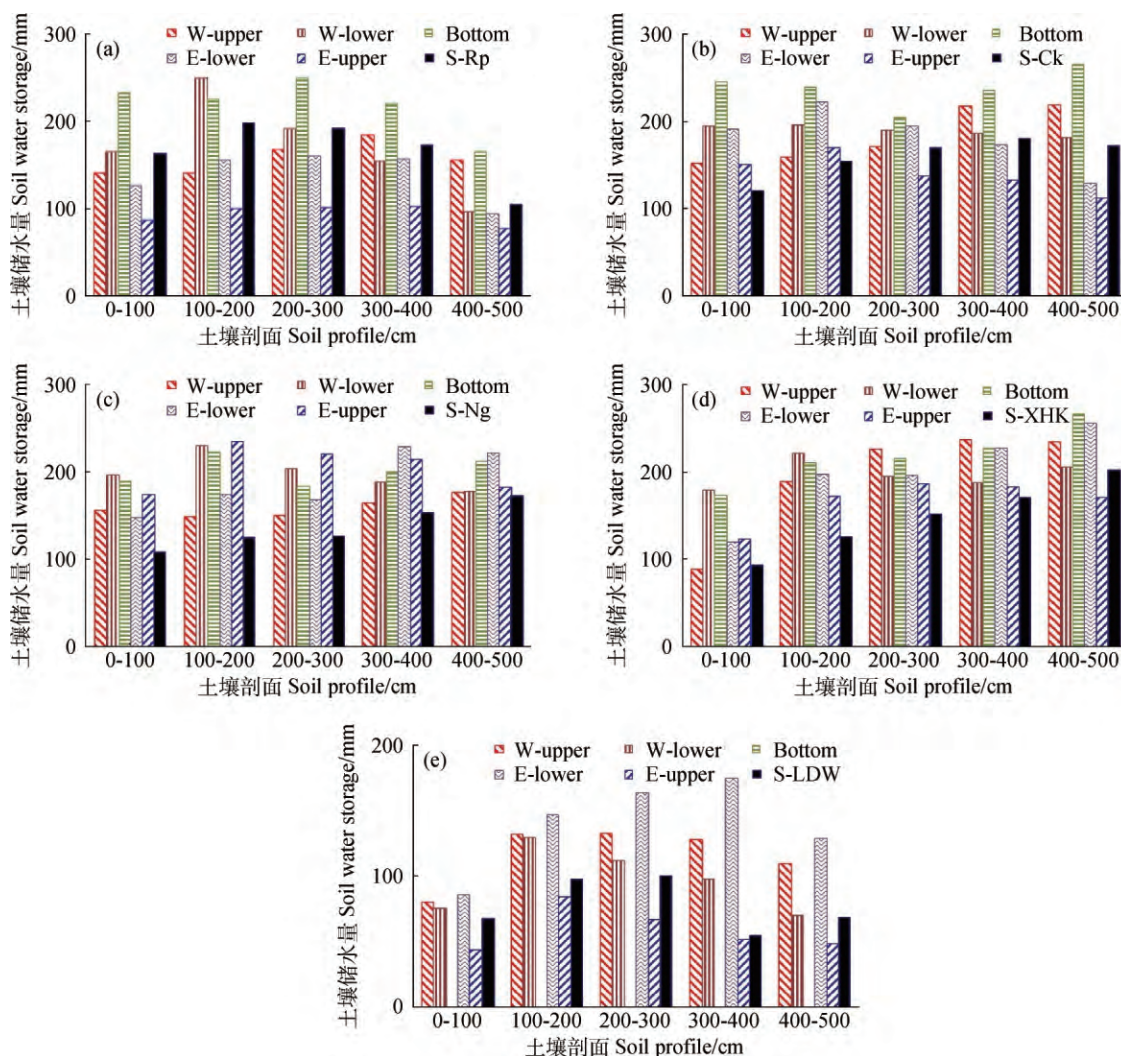


图 3 不同植被恢复模式和不同降雨量地区沟谷地坡位间 0~500 cm 剖面土壤储水量

Fig. 3 Soil water storage along 0~500 cm profile at different gully positions associated with different vegetation restoration patterns and different precipitation regions

注: (a): 刺槐沟谷地; (b): 柠条沟谷地; (c): 天然草地沟谷地; (d): 西河口沟谷地; (e): 镰刀湾沟谷地

Note: (a): *R. pseudoacacia* gully; (b): *C. korshinskii* gully; (c): Natural grassland (Yanhewan) gully; (d): Xihekou gully; (e): Liandaowan gully

不同降雨量沟谷地 0~500 cm 剖面上土壤温度总体上表现随土层加深而下降的趋势,且 0~100 cm 温度降幅最大(表 3)。不同降雨量条件下,沟谷地 0~500 cm 剖面土壤温度的平均值表现为镰刀湾 > 西河口 > 沿河湾,变异系数呈现出沿河湾 > 西河口 > 镰刀湾。

### 2.5 沟谷地土壤温度剖面分布特征

不同植被恢复模式间沟谷地 0~500 cm 剖面土壤温度空间分布存在一定差异(图 4a,b,c)。总体上,3 种不同植被恢复模式沟谷地土壤温度的变化趋势略有不同,0~60 cm 土壤温度变幅为草本 >

灌木 > 乔木,同一沟谷地内不同坡位间土壤温度也略有差异,其中,刺槐沟不同坡位间较灌木沟和草地沟明显。

不同降雨量沟谷地不同坡位上 0~500 cm 剖面土壤温度的空间分布差异不明显(图 4c,d,e)。总体上,地处 3 个不同降雨量梯度环境下天然草地沟谷地的土壤温度变化趋势略有不同,同一沟谷地内不同坡位间土壤温度也略有差异;其中,沿河湾沟谷地土壤温度明显低于对照,西河口也有同样趋势且与对照相差幅度变小;镰刀湾沟谷地不同坡位间土壤温度的变化趋势基本一致且与对照坡面草地土壤温度也较为一致。

表 3 不同植被类型和降雨量条件下沟谷地剖面土壤温度的平均值和变异系数

Table 3 Mean value and coefficient variation of soil temperature in different vegetation types and precipitation gullies

沟道 Gully		土层 Soil layers /cm					
		0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	0~500
G-Rp	Mean %	13.03 <sup>a</sup>	11.09 <sup>b</sup>	10.08 <sup>c</sup>	10.02 <sup>c</sup>	10.10 <sup>c</sup>	10.87
	CV %	12.28	10.72	7.09	9.74	4.47	14.34
G-Ck	Mean %	12.66 <sup>a</sup>	10.38 <sup>b</sup>	9.27 <sup>c</sup>	8.80 <sup>c</sup>	9.06 <sup>c</sup>	10.04
	CV %	22.53	12.75	21.62	21.51	11.26	23.60
G-Ng	Mean %	14.68 <sup>a</sup>	9.55 <sup>b</sup>	8.70 <sup>b</sup>	8.80 <sup>b</sup>	9.04 <sup>b</sup>	10.15
	CV %	28.69	12.51	10.53	9.78	8.60	30.15
G-XHK	Mean %	20.33 <sup>a</sup>	14.76 <sup>b</sup>	12.18 <sup>c</sup>	11.31 <sup>c</sup>	11.00 <sup>c</sup>	13.91
	CV %	15.19	13.66	9.97	8.14	10.66	28.27
G-LDW	Mean %	21.90 <sup>a</sup>	15.91 <sup>b</sup>	14.33 <sup>c</sup>	13.63 <sup>c</sup>	13.41 <sup>c</sup>	15.88
	CV %	16.75	8.35	5.87	6.58	10.68	23.36

注: 同行不同小写字母表示同一沟谷地不同土层间土壤温度差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference at the 0.05 level among soil temperature in different soil layers on the same gully

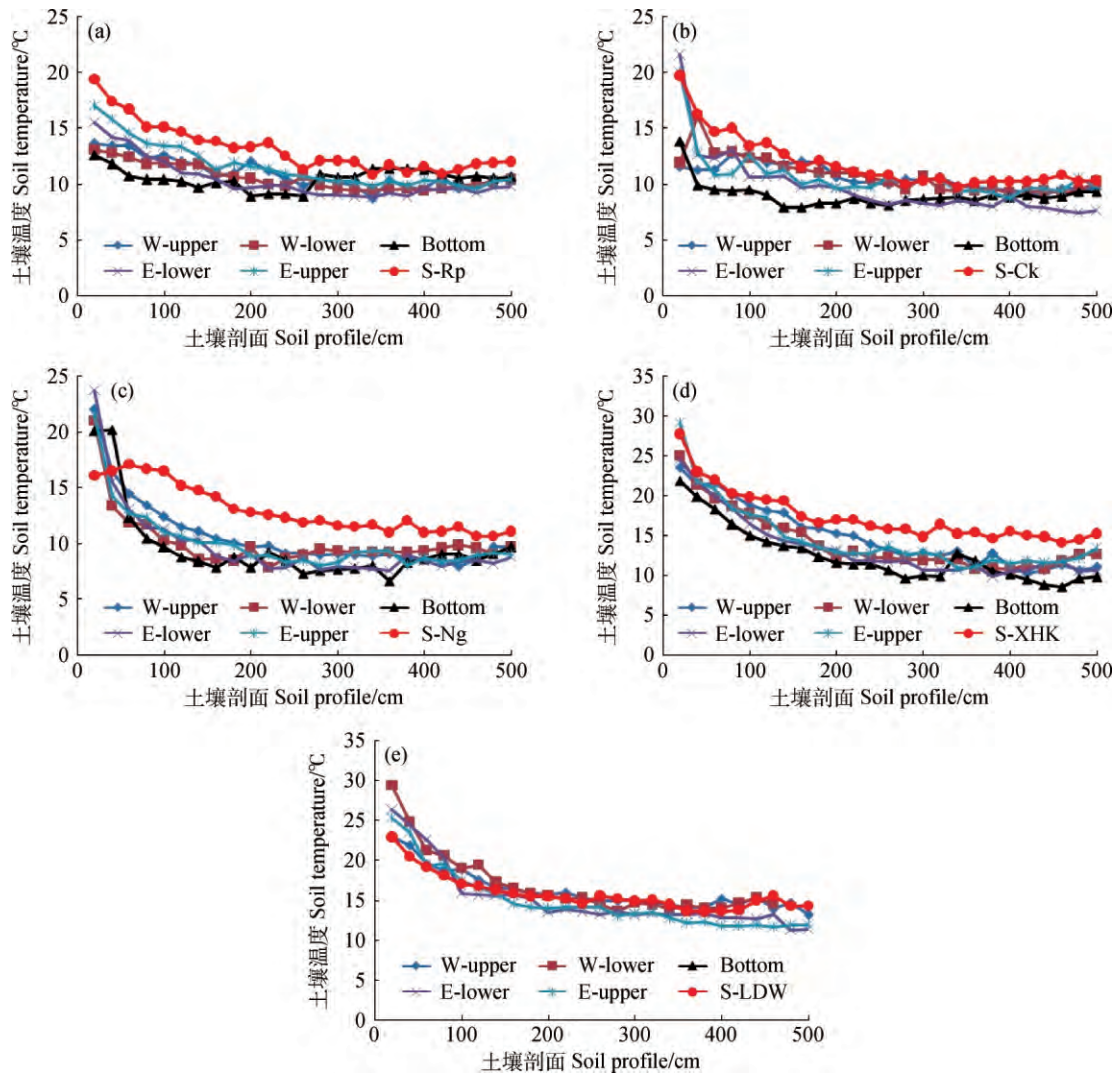


图 4 不同植被恢复模式和不同降雨量地区沟谷地坡位间 0~500 cm 剖面土壤温度

Fig. 4 Soil temperature along 0~500 cm profile at different gully positions associated with different vegetation restoration patterns and different precipitation regions

注: (a): 刺槐沟谷地; (b): 柠条沟谷地; (c): 天然草地沟谷地; (d): 西河口沟谷地; (e): 镰刀湾沟谷地  
 Note: (a): *R. pseudoacacia* gully; (b): *C. korshinskii* gully; (c): Natural grassland (Yanhewan) gully; (d): Xihekou gully; (e): Liandaowan gully

## 2.6 沟谷地间土壤水分和温度的比较

通过对不同植被恢复模式沟谷地的土壤水分和土壤温度的独立性配对 T 检验分析。不同恢复模式沟谷地间的土壤水分和土壤温度都存在显著性差异(表 4),表明沟谷地植被类型不同将会影响土壤水分和温度的显著性差异;具体表现出刺槐沟与柠条沟和草地沟间土壤水分差异显著水平分别为  $P < 0.001$  和  $P < 0.001$ ,土壤温

度差异显著水平分别为  $P < 0.001$  和  $P < 0.05$ ;而柠条沟与草地沟在土壤水分和温度间均无显著性差异。

不同降雨梯度沟谷地间的土壤水分和温度均存在显著性差异(表 4),具体表现为:除西河口与沿河湾在土壤水分间无显著性差异( $P = 0.400$ ),其余均为显著性差异  $P < 0.001$ 。结果表明降雨量不同可造成沟谷地土壤水分和温度间的显著差异。

表 4 不同沟谷地间土壤水分和温度的独立性 T 检验

Table 4 Differences in soil moisture and temperature among pairwise comparisons between gullies based on two-tailed paired t-tests and F test

样本对 Sample pairs	含水量 Soil moisture				温度 Temperature			
	F	Sig.	t	Sig. (双侧)	F	Sig.	t	Sig. (双侧)
G-Rp vs. G-Ck	5.52	0.020	-5.14	0.000	3.04	0.083	3.27	0.001
G-Rp vs. G-Ng	23.33	0.000	-6.25	0.000	11.61	0.001	2.31	0.021
G-Ck vs. G-Ng	6.83	0.009	-0.75	0.457	2.91	0.089	-0.34	0.733
G-XHK vs. G-Ng	5.27	0.023	0.84	0.400	13.19	0.000	8.43	0.000
G-XHK vs. G-LDW	0.05	0.828	15.21	0.000	1.52	0.218	-3.80	0.000
G-Ng vs. G-LDW	6.13	0.014	17.57	0.000	4.26	0.040	-12.63	0.000

## 2.7 沟谷地水分状况统计

从不同植被恢复模式和降雨量梯度条件下沟谷地和坡面的土壤水分状况统计分析来看(表 5),不同植被恢复模式间沟谷地的土壤有效水量表现出草地沟(672.24) > 柠条沟(652.55) > 刺槐沟(497.71),且刺槐沟 500 cm 水分亏缺率最高为 32.50%;沟谷地土壤水分状况与降雨量

梯度呈现正相关,即降雨量高的地区沟谷地土壤水分含量高;值得注意的是在降雨量 400 mm 的镰刀湾沟谷地土壤水分亏缺率达到了 64.30%,略低于坡面 66.42%;表明这一地区的土壤水分状况亏缺相当严重。不同植被类型间坡面土壤水分亏缺率表现为草地(40.73%) > 柠条林(31.06%) > 刺槐林(28.16%)。

表 5 沟谷地土壤水分状况分析

Table 5 Analysis of gully soil water content

沟谷地 Gully	平均含水量 Average moisture content/%	储水量 Storage of soil water content/mm	有效水量 Available water capacity/mm	水分亏缺量 Water Deficit/mm	水分亏缺率 Ratio of water deficit/%
G-Rp	12.37	780.49	497.71	375.77	32.50
G-Ck	14.89	935.33	652.55	220.93	19.11
G-Ng	15.18	955.02	672.24	201.24	17.40
G-XHK	15.51	979.62	696.84	176.63	15.28
G-LDW	8.42	412.82	474.44	743.44	64.30
S-Rp	12.20	830.63	484.83	325.63	28.16
S-Ck	12.65	797.10	514.32	359.15	31.06
S-Ng	10.95	685.29	402.51	470.97	40.73
S-XHK	11.66	744.66	457.56	411.60	35.60
S-LDW	6.07	388.31	103.11	767.95	66.42

## 3 讨论

土壤作为农业生产的基本资料和作物生长的重要环境条件,是一种疏松多孔的物体,由大小不等的微细土粒堆集而成,在固体颗粒之间是各种大小、形状各异的孔隙,所以土壤是由固、液、气三相组成的。土壤的固相包括矿物质和有机质,液相即土壤水分,气相即土壤空气。在土壤的组成部分中,固体部分的数量一般变化不大,而空气和水的含量却是经常变化

的。因此,土壤的比热容主要取决于其中水和空气的含量。土壤水分的运动和土壤中热量的传输是一个统一不可分割的动态系统<sup>[18]</sup>,研究土壤水分和温度的分布特征,有利于揭示二者的变化规律。本研究分析了黄土丘陵区不同植被恢复模式和降雨量沟谷地地貌单元土壤水分和温度的空间分布特征。

不同植被恢复模式对沟谷地的土壤水分和温度的影响差异显著。由于不同植被恢复模式的群落优势种在生活型(乔、灌、草)上不同,他们在水分利用率、小气候调节能力、土壤改善等方面对生境条件产



生综合影响,进而导致不同植被恢复模式沟谷地土壤水分和温度的分异。3种不同植被恢复模式沟谷地土壤水分含量呈现出草地沟>灌木沟>乔木沟,这与不同植物生活型水分消耗能力吻合<sup>[18]</sup>,如不同生活型植物间根系分布深度及其对水分吸收利用的差异。3种不同植被恢复模式沟谷地土壤温度的平均值呈现出乔木沟>草本沟>灌木沟,这与不同植物生活型的小气候调节能力差异相关,由于不同生活型植被在形态上的明显差异,通过对光照、风速、降雨等产生影响,进而影响着土壤温度的变化,其中,乔木植被在微气候调节方面优势最大。

不同降雨梯度沟谷地间土壤水分和温度存在差异。尽管调查地区都属安塞县境内,但在年均降雨量存在梯度差异(400~550 mm)。3个降雨梯度沟谷地0~500 cm剖面土壤平均含水量表现为西河口>沿河湾>镰刀湾,这表面在半湿润和半干旱条件的黄土高原沟谷地貌单元的土壤水分与降雨量条件一致,随着沟坡变得更加陡峭及地区降雨量减少,在镰刀湾地区沟谷地的一些坡位土壤含水量也会低于对照坡面草地。沟谷地0~500 cm剖面土壤温度的平均值为镰刀湾>西河口>沿河湾,变化趋势与降雨量基本相反,这反映了土壤温度与土壤水分的运动紧密联系<sup>[19]</sup>;沟谷地在一定程度上由于地势原因,会在接受太阳辐射能量方面相对于坡面有所减少,而土壤温度的能量主要来源就是太阳的辐射能。因此,在西河口和沿河湾可以看出较为明显的坡面与沟谷地在土壤温度间的差异。镰刀湾沟坡和坡面在土壤温度上基本一致,与前两者(西河口和沿河湾)的沟坡土壤温度特征不一致,其主要原因可能是镰刀湾地区沟坡系统土壤中含水量明显不足,且几乎没有自由水,土壤与环境的热量交换以空气为媒介,可能是形成坡面与沟谷地间土壤温度差异不明显的重要原因。

#### 4 结论

本研究基于不同植被类型(乔、灌、草)和相同植被类型(天然草地)不同降雨量(550 mm、500 mm、400 mm)梯度沟谷地空间(5个代表性坡位)上土壤水分和温度的剖面分布特征的调查研究,以同一地区坡面对应植被类型样地为对照,揭示了植被类型和降雨量梯度对沟谷地土壤水分和温度分布的影响。

结果表明,不同植被类型沟谷地土壤水分和温度间存在着显著差异,不同生活型植物的生物学特性可以对植物群落土壤的水分和温度产生分异。不

同降雨梯度地区沟谷地土壤水分和温度间存在显著差异,降雨量差异可以对沟谷地的土壤水分和温度产生显著影响。因此,在黄土丘陵区沟谷地地貌植被恢复重建过程中,需要综合考虑地区降雨条件,进而注意植被类型的配置,这将有助于促进地区生态环境的改善和提升。

#### 参考文献

- [1] 辛继红,高红贝,邵明安. 土壤温度对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(3):217-220
- [2] 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报,2009,46(2):227-234
- [3] 张强,王胜. 干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射平衡年变化规律研究[J]. 自然科学进展,2007,17(2):211-216
- [4] 范爱武,刘伟,王崇琦. 不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟[J]. 太阳能学报,2003,24(3):167-171
- [5] 程积民,万惠娥,胡相明. 黄土丘陵区植被恢复重建模式与演替过程研究[J]. 草地学报,2005,13(04):324-327,333
- [6] 雷阿林,唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报,1997,17(3):37-43
- [7] 张健,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区沟谷地植被恢复群落特征研究[J]. 草地学报,2008,16(05):485-490
- [8] van den Elsen E, Xie Y, Liu B Y, et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China[J]. Catena,2003,54(1-2):93-115
- [9] Huo Z, Shao M A, Horton R. Impact of gully on soil moisture of shrubland in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Pedosphere,2008,18(5):674-680
- [10] Melliger J J, Niemann J D. Effects of gullies on space-time patterns of soil moisture in a semiarid grassland[J]. Journal of Hydrology,2010,389(3-4):289-300
- [11] 高晓东. 黄土丘陵区小流域土壤有效水时空变异与动态模拟研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2013
- [12] 焦峰,温仲明,李锐. 黄土丘陵区(安塞)县域尺度土地类型结构评价[J]. 水土保持研究,2005,23(01):30-31,131
- [13] 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学(D辑:地球科学),1998,28(4):357-365
- [14] 李玉山,韩仕峰,汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[G]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985,2:1-17
- [15] 张健,刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. 自然资源学报,2010,25(02):207-217
- [16] 徐明,张健,刘国彬,等. 不同植被恢复模式沟谷地植被-土壤系统耦合关系评价[J]. 自然资源学报,2016,31(12):2137-2146
- [17] Xu M, Zhang J, Liu G B, et al. Soil properties in natural grassland, *Caragana korshinskii* planted shrubland, and *Robinia pseudoacacia* planted forest in gullies on the hilly Loess Plateau, China[J]. Catena,2014,119:116-124
- [18] 王国梁,刘国彬,常欣,等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报,2002,17(3):339-344
- [19] 李慧星,夏自强,马广慧. 含水量变化对土壤温度和水分交换的影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(2):172-175

(责任编辑 位晓婷)