青海湖流域芨芨草斑块对地表水分再分配过程的影响

蒋志云[1]，张思毅[2,3]，吴华武[4]，魏俊奇[5]，黄楚珩[1]，李小雁[5]

(1.华南师范大学 地理科学学院，广东 广州 510631；2.广东省生态环境研究所 广东省农业环境综合治理重点实验室，广东 广州 510650；3.华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心，广东 广州 510650；4.中国科学院 流域地理学重点实验室，中国科学院 南京地理与湖泊研究所，江苏 南京 210008；5.北京师范大学 地理科学学部 自然资源学院，北京 100875)

摘　要：[目的] 研究芨芨草斑块对降雨再分配和地表径流过程的影响，为揭示植被斑块的形成与水分调控机理提供依据。[方法] 以青海湖流域芨芨草斑块为例，通过对芨芨草斑块冠层降雨再分配和地表径流进行试验观测，计算水平方向芨芨草斑块水分补偿比例。[结果] ①芨芨草斑块穿透雨占降雨量比例为70.58%，穿透雨主要受降雨量、降雨强度和降雨历时的影响，芨芨草斑块冠层对降雨再分配过程的影响和多数干旱区灌木相似；②芨芨草斑块平均径流系数为 0.45%±0.33%，明显低于基质区(2.08%±1.46%)，且随着降雨量增加而呈增大趋势；③芨芨草斑块水分补偿比例为 1.13%±1.34%，且随着降雨量和降雨强度增加而增大，最高可达到 4.94%。[结论] 在生态系统尺度，芨芨草斑块会受到来自基质区的径流补偿，这是斑块植被一种适应干旱的水分调控策略。

关键词：植被斑块；穿透雨；地表径流；芨芨草；青海湖流域

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)05-0008-07　　**中图分类号**：P334，Q945.17

文献参数：蒋志云，张思毅，吴华武，等.青海湖流域芨芨草斑块对地表水分再分配过程的影响[J].水土保持通报，2020，40(5)：8-14. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20200803.001；Jiang Zhiyun，Zhang Siyi，Wu Huawu，et al. Effects of *Achnatherum splendens* patchy on redistribution of surface water flow in Qinghai Lake watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(5)：8-14.

Effects of *Achnatherum Splendens* Patchy on Redistribution of Surface Water Flow in Qinghai Lake Watershed

Jiang Zhiyun[1]，Zhang Siyi[2,3]，Wu Huawu[4]，Wei Junqi[5]，Huang Chuheng[1]，Li Xiaoyan[5]

(1. *School of Geography，South China Normal University，Guangzhou，Guangdong* 510631，*China*；2. *Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management，Guangdong Institute of Eco-environmental Science & Technology，Guangzhou，Guangdong* 510650，*China*；3. *National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China，Guangzhou，Guangdong* 510650，*China*；4. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences，Nanjing Institute of Geography and Limnology，Chinese Academy of Sciences，Nanjing，Jiangsu* 210008，*China*；5. *School of Natural Resources，Faculty of Geographical Science，Beijing Normal University，Beijing* 100875，*China*)

Abstract：[Objective] The impacts of *Achnatherum splendens* patches on rainfall partitioning and surface runoff were studied to provide a basis for revealing the formation of vegetation patches and the mechanism of water regulation recognition. [Methods] The deep-rooted grass of *A. splendens* was used in the Qinghai Lake watershed as an indicator plant to calculate the water compensation ratio of *A. splendens* patches in the horizontal direction by observing the redistribution of rainfall and surface runoff in the crown of *A. splendens* patches. [Results] ① The throughfall of the *A. splendens* patch accounted for 70.58% of the total rainfall and was mainly affected by rainfall，rain intensity，and duration. This was similar to most shrubs in arid ecosystems. ② The mean runoff coefficient of the *A. splendens* patch was 0.45%±0.33%. This was significantly

收稿日期：2020-05-20　　**修回日期**：2020-06-25

资助项目：国家自然科学基金项目“城市森林冠层降水再分配及其对重金属沉降的影响：以广州帽峰山为例”(41901027)；广东省科技创新战略专项资金博士启动项目“广州市典型乔木降雨再分配过程对降尘重金属运移的影响研究”(2018A030310517)；黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目“近 40 年黄土高原蒸散发时空变化规律及其归因分析”(SKLLQG1910)

第一作者：蒋志云(1989—)，男(汉族)，湖南省耒阳市人，博士，讲师，主要从事生态水文学研究。Email：zyjiang@scnu.edu.cn。

lower than that of the matrix (2.08%±1.46%) and increased with rainfall. ③ The water compensation of the *A. splendens* patch accounted for 1.13%±1.34% of total rainfall, and it increased with rainfall and rain intensity. The highest value of the proportion of water compensation was 4.94%. [Conclusion] The *A. splendens* patch can be recharged by the runoff from the matrix in the ecosystem scale, which is the water regulation mechanism of drought adaptation for patchy vegetation in arid regions.

Keywords: patchy vegetation; throughfall; runoff; *Achnatherum splendens*; Qinghai Lake watershed

斑块状植被格局是干旱半干旱区十分常见的景观类型[1-2],其格局的变化常被看作是生态系统响应气候变化与人类活动产生突变的"指示器"[3-4]。因此,揭示植被斑块形成及其与水文过程的相互作用机理,对于理解全球变化背景下植物的干旱适应机制具有重要意义[5]。

地表水文过程对植被斑块形成、维持及演变起着十分重要的作用[6-7]。降雨是干旱半干旱地区植物的主要水源,降雨经过植被冠层进入土壤前会发生两次再分配过程[8]。首先,降雨经过植被冠层时,一部分雨水被冠层截留,一部分雨水穿过冠层形成穿透雨,还有一部分水分会沿着枝干以树干茎流的形式流到地表[9];而穿透雨和树干茎流到达地表后,水分会在地表发生第二次再分配过程:渗入土壤或形成地表径流。目前植被斑块对地表水文过程的影响研究认为,植被斑块能减缓径流速度,促进降雨入渗,进而减少了径流量和产沙量[10],从而拦截地表径流并"捕获"径流带来的水分和养分[11]。因此植被斑块与水分再分配间存在正反馈关系,通常认为植被斑块是地表水分的"汇",而裸地斑块(基质区)是水分的"源"[12-13]。揭示植被斑块地表水文过程的"源—汇"关系,对于认识脆弱生境植被斑块格局与过程的适应机制具有重要意义[14]。然而,目前在植被斑块与地表水文过程研究中,主要侧重于单一过程,如植被斑块冠层降雨再分配或者植被斑块对地表径流的影响等,将冠层降雨再分配与地表水再分配过程整体考虑的试验研究十分缺乏,这在一定程度上限制了对植被斑块与地表水文过程相互作用关系的认识。此外,目前关于植被斑块的研究主要集中在灌木斑块[5],而对于深根性草丛斑块的研究相对较少,草丛斑块对地表水文过程的影响机理是否存在其特殊性,缺乏相关试验研究。

芨芨草(*Achnatherum splendens*)是一种广泛分布在干旱半干旱地区具有耐寒、耐旱、耐盐碱等特点的多年生草本植物,常呈斑块状分布景观[15]。青海湖流域位于青藏高原东北部,是气候变化的敏感区及生态脆弱区。流域内分布着大面积的芨芨草,其分布区主要位于青海湖北部至东南部海拔较低的湖岸冲洪积平原,是环湖地区重要的生态屏障,也是人畜活动的主要聚集地[16]。然而,近几十年来,受气候变化与人类活动的影响,芨芨草分布的环湖地区草地退化与生态系统功能下降等问题较为突出,具体表现为水源涵养能力降低、水土流失、草地退化及荒漠化等[17-18]。但目前关于流域内芨芨草斑块格局特征及其对水文过程,特别是地表水文过程的影响机理缺乏深入认识。本文以青海湖流域芨芨草斑块群落为研究对象,通过野外试验观测芨芨草斑块冠层—地表水分再分配过程,揭示芨芨草斑块格局在生态系统尺度上对地表水文过程的影响,旨在探索植被斑块的形成与水分调控机理。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

青海湖流域芨芨草群落主要集中分布于青海湖湖盆区北部和东南部海拔 3 200～3 350 m 平坦开阔的湖岸冲洪积平原、河谷阶地及山前缓坡,西起鸟岛北部,经泉吉、刚察等地,沿东南方向至倒淌河地区,形成一条宽约 1～15 km 的弧形植被带,地理范围为 36°34′—37°40′N,99°52′—101°04′E。试验样地位于青海湖流域北岸刚察县内(37°14′53″N,100°14′9″E),该地区属于高原大陆性气候,据刚察县多年气象观测,平均气温为－0.6 ℃,年均降水量为 370.3 mm。芨芨草斑块群落结构分为 3 层,最高层为芨芨草草丛,第二层为其他禾草如冰草(*Agropyron cristatum*)、针茅(*Stipa capillata*)、羊草(*Leymus chinensis*)、早熟禾(*Poa annua*)等,最底层为一些低矮的杂草,如冷蒿(*Artemisia frigida*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)等。本文将芨芨草草丛冠层垂直投影区域称为芨芨草斑块,芨芨草斑块之间生长低矮杂草区域称为基质区。坡度约为 1°～2°,芨芨草斑块相比基质区地势稍低。土壤类型以栗钙土为主,地表无砾石覆盖,土壤黏粒含量为 2%～10%,粉粒含量为 34%～56%,砂粒含量为 35%～60%[19],土层深度约为 100 cm,土壤 pH 值和土壤容重分别为 9.08,1.21 g/cm^3[20]。

1.2　试验设计

1.2.1　样地设置　根据样方法调查研究区芨芨草斑块冠幅平均面积约为 1 m^2,选择典型芨芨草斑块分

布区建立地上水文过程观测样地，样地尺寸为 10 m×10 m，3 个重复样地，其地形和植被特征非常接近（见表 1）。在样地内设置穿透雨、地表径流观测试验，具体试验设置见下文。在观测样地附近 100 m 内安装有自动气象站，主要监测大气降水、土壤温湿度等气象要素。

表 1 样地地形与植被特征

特 征	样地 1	样地 2	样地 3
坡度/(°)	1.1	1.2	1.1
斑块总数量/个	28	26	29
斑块总面积/m^2	36.76	34.81	35.78
径流小区斑块数量/个	5	5	5
径流小区斑块面积/m^2	6.60	6.12	6.38

1.2.2 *芨芨草斑块穿透雨试验* 芨芨草由于枝干纤细，故而在本文中未考虑树干茎流，冠层降雨再分配主要包括穿透雨与冠层截留。在每个观测样地选择 3 个形态相似的芨芨草斑块（冠幅尺寸约为 2 m×2 m），在斑块中垂直放置自制穿透雨收集瓶，收集瓶横竖间距均为 50 cm，每个斑块中 5 行 4 列共 20 个收集瓶。

每次降雨后立即量取收集瓶中的穿透雨，穿透雨量和穿透雨率通过如下公式计算得到：

$$Th_v=\frac{1}{20}\sum_{i=1}^{20}10\times V_i/A_i \tag{1}$$

$$Th_p=Th_v/P \tag{2}$$

式中：Th_v 和 Th_p 分别表示穿透雨量（mm）和穿透雨率（%）；V_i 和 A_i 分别为某次降雨某个收集瓶穿透雨体积量（ml）和收集瓶的表面积（cm^2）；P 为降雨量（mm）。试验观测时间为 2014 年 5 月至 2015 年 9 月。

1.2.3 *地表径流观测试验* 每个观测样地布设 3 种径流观测小区：单个芨芨草斑块、基质区以及芨芨草斑块—基质镶嵌区。单个芨芨草斑块和基质区径流小区尺寸为 1 m×1 m，而芨芨草斑块—基质镶嵌区的径流小区尺寸为 4 m×4 m，每种径流小区选择设置 3 个重复。安装收集装置时将径流小区四周开挖约 15 cm 小沟，将铁皮插入沟中并填土压实，在坡形低洼处设置出水口，将出水导管连接储水桶，并将水桶放置在土坑中。每次降雨后立即量取储水桶中的径流，径流系数计算如下：

$$RF_\omega=RF/P \tag{3}$$

$$RF=10\times RF_v/S \tag{4}$$

式中：RF_ω 表示径流系数；RF 表示某次径流量（mm）；P 表示降雨量（mm）；RF_v 表示径流体积量（ml）；S 表示径流小区面积（cm^2）。下同。

1.3 数据分析

1.3.1 *芨芨草斑块地表水分补偿比例计算* 假设芨芨草斑块径流系数为 R_1，基质区径流系数为 R_2，芨芨草斑块—基质区镶嵌区整体径流系数为 R_3，则芨芨草斑块地表水分补偿量 I，即基质区流向芨芨草斑块的径流量，可计算为：

$$R_1S_1P+R_2S_2P-IS_1=R_3(S_1+S_2)P \tag{5}$$

$$I=\left[R_1+R_2\frac{S_2}{S_1}-R_3\left(\frac{S_1+S_2}{S_1}\right)\right]P \tag{6}$$

水分补偿比例 I/P：

$$I/P=\left[R_1+R_2\frac{S_2}{S_1}-R_3\left(\frac{S_1+S_2}{S_1}\right)\right]\times 100\% \tag{7}$$

式中：S_1，S_2 分别为芨芨草斑块和基质区的面积（m^2）。

1.3.2 *方差分析* 采用偏相关分析的方法讨论穿透雨与各因素之间的相关关系，应用方差分析对比 3 种芨芨草斑块、基质区和芨芨草斑块—基质区间平均径流系数的差异。数据统计分析采用 SPSS 17.0（SPSS，Chicago，USA）软件，置信水平为 $p<0.01$。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

2014—2015 年芨芨草样地总降雨量约为 719 mm，降雨主要集中在 5—9 月份，其中大降雨事件主要发生在 7—8 月份（见图 1）。从次降雨记录来看，小降雨事件（0～5 mm）频次较高，约占总降雨事件次数 65%，占年降雨量 20%左右；中等降雨事件（5～15 mm）发生频次次之，约占总降雨事件次数 25%，占总降雨量的 50%；大降雨事件（>15 mm）发生频次最低，约占总降雨事件 10%，且占总降雨量的 30%。

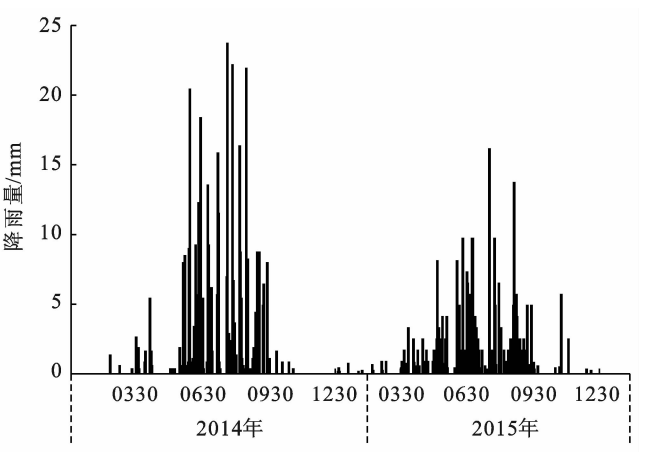


图 1 2014—2015 年芨芨草样地日降雨量

2.2 芨芨草斑块冠层降雨再分配及其影响因素分析

研究期间共收集了 62 次降雨事件的芨芨草斑块穿透雨量，期间总降雨量为 498.79 mm，次降雨范围

为 0.30～35.78 mm,穿透雨总量为 352.05 mm,范围为 0.13～28.87 mm,穿透雨所占比例(穿透雨占降雨量比例)为 70.58%(范围为 39.71%～90.41%),冠层截留量所占降雨量比例约为 29.4%(范围为 9.51%～60.29%)。

根据目前关于降雨再分配影响因素研究,气象因素(如降雨特征、风速风向等)是影响再分配过程的主要因素[21-22],因此本研究主要考虑降雨量、降雨强度、降雨历时和风速风向等气象因素对降雨再分配过程的影响。从相关分析结果来看(见表 2),穿透雨量与降雨量、降雨历时及降雨强度间存在显著的正相关关系,与降雨量的相关系数达 0.937,依次为降雨历时(0.673)、降雨强度(0.419),而与风速风向之间存在较弱的负相关关系。

表 2　芨芨草斑块穿透雨量与各气象因素间的偏相关关系

	RF (CF:RI,RD,WS,WD)	RI (CF:RF,RD,WS,WD)	RD (CF:RF,RI,WS,WD)	WS (CF:RF,RI,RD,WD)	WD (CF:RF,RI,RD,WS)
TF	0.937**(N=62)	0.419**(N=62)	0.673**(N=62)	−0.226(N=62)	−0.049(N=62)
TFP	−0.101(N=62)	0.160(N=62)	0.248(N=62)	−0.257(N=62)	−0.185(N=62)

注:RF 为降雨量,RI 为降雨强度,RD 为降雨历时,WS 为风速,WD 为风向,TF 为穿透雨,TFP 为穿透雨占降雨量比例,CF 为控制因素;* 和 * * 分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著。

2014—2015 年穿透雨量随降雨量增大而线性增大($p<0.01$,$R^2=0.984$,见图 2),而线性模型斜率为 0.739,说明穿透雨量约占降雨量的 73.9%,与实测穿透雨比例平均值接近。将穿透雨所占比例与降雨量之间的关系进行指数、对数、幂函数及双曲线函数拟合,比较发现指数模型具有较高的拟合关系,能够较好地反映穿透雨所占比例随降雨量的变化关系($p<0.01$)。在本研究中,根据指数模型拟合曲线知,芨芨草斑块穿透雨所占比例在降雨量大于 10 mm 后趋于稳定,稳定值约为 72.32%。

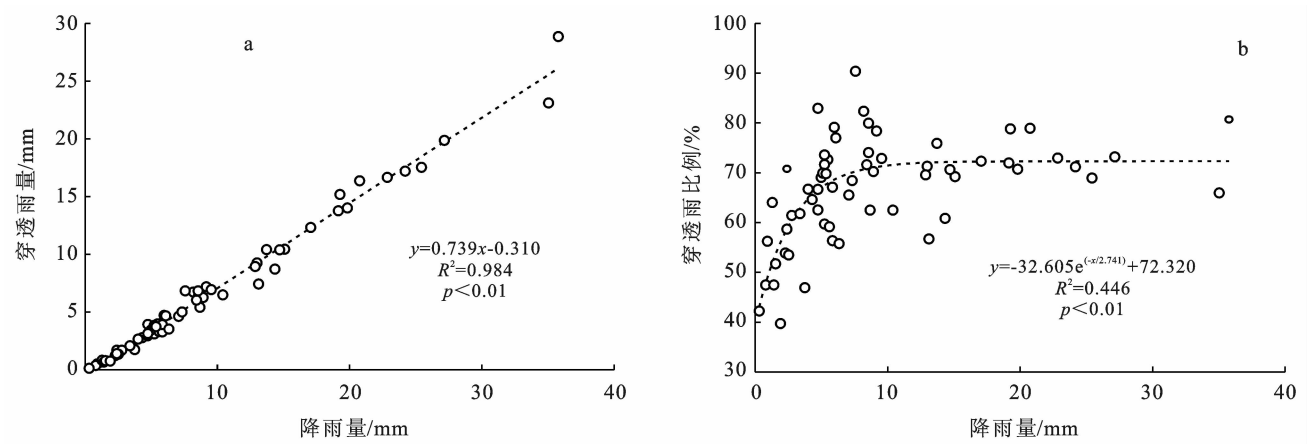


图 2　芨芨草斑块穿透雨量及穿透雨量占降雨量比例与降雨量间关系

研究区试验期间降雨以历时较短的阵雨为主,降雨过程中雨量分配并不均匀,因此平均雨强不能很好地反映实际的降雨强度,本文选取次降雨的最大 10 分钟雨强(I_{10})进行分析。从给出的 I_{10} 与穿透雨、冠层截留所占比例的拟合关系可知(图 3a),芨芨草斑块穿透雨所占比例随雨强的增大而增大,当 $I_{10}>8$ mm/h 后趋于平缓,根据指数函数拟合方程可得穿透雨所占比例极限值约为 68.83%。

降雨历时是降雨的主要特征之一,也是影响植被降雨再分配过程的重要因素。从建立的降雨历时与穿透雨所占比例之间的关系来看(图 3b),指数模型能够较准确地反应它们之间的关系,芨芨草斑块冠层降雨再分配过程与降雨历时之间存在显著联系($R^2=0.4$,$p<0.01$)。穿透雨所占降雨量的比例随降雨历时的增大而迅速增大(降雨历时小于 5 h),当降雨历时大于 5 h 时,穿透雨所占比例趋于稳定,由指数拟合模型得到的稳定值约为 73.05%。

2.3　地表径流再分配过程

2014—2015 年共收集 54 次降雨事件的地表径流,芨芨草斑块平均径流系数为 0.45%,基质区为 2.08%,芨芨草—基质镶嵌区为 0.78%。从径流观测的结果来看(见表 3),芨芨草斑块与芨芨草—基质镶嵌区的产流临界降雨量均为 1.53 mm,而基质区的临界产流降雨量为 0.30 mm,说明基质区相对芨芨草

斑块更易产流。芨芨草斑块径流系数范围为 0.08%～2.76%，基质斑块为 0.02%～9.17%，芨芨草—基质镶嵌区为 0.01%～3.86%，同时，基质区的产流量（最大值与平均值）也显著高于芨芨草斑块与芨芨草—基质镶嵌区，而芨芨草—基质镶嵌区的产流量（最大值与平均值）略高于芨芨草斑块。

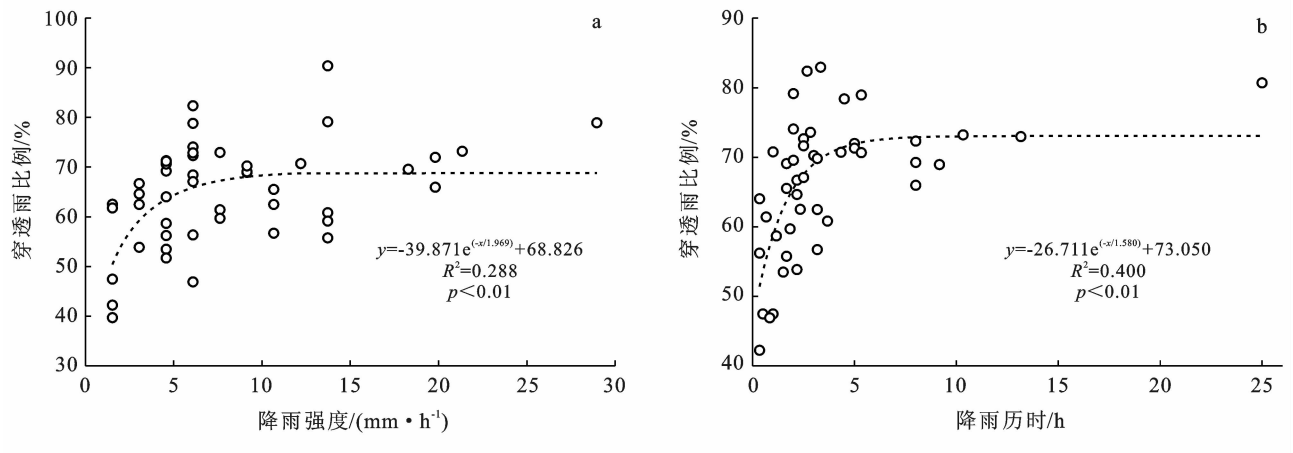


图 3 降雨强度及降雨历时和芨芨草斑块穿透雨比例间关系

表 3 2014—2015 年青海湖流域芨芨草斑块与基质区径流系数

项 目	芨芨草斑块	基质区	芨芨草—基质镶嵌区
平均径流系数/%	0.45±0.33[a]	2.08±1.46[b]	0.78±0.51[ab]
最大径流系数/%	2.76	9.17	3.86
最小径流系数/%	0.08	0.02	0.01
临界产流降雨量/mm	1.53	0.30	1.53

注：同一行不同小写字母表示在 $p<0.05$ 水平存在显著差异。

径流系数方面，随着降雨量梯度的增大，径流系数呈增大的趋势（见图 4），且径流系数芨芨草斑块＜芨芨草—基质镶嵌区＜基质区。

由公式(3)可计算出芨芨草斑块水平方向水分补偿比例，2014—2015 年 54 场降雨事件水分补偿比例约为 1.13%±1.34%，且水分补偿比例和降雨量、降雨强度间存在正相关关系（见图 5）。随着降雨量增加，水分补偿比例呈增大趋势，但水分补偿比例与降雨强度之间相关性更强（$R^2=0.62$，$p<0.01$），当最大 10 min雨强小于 10 mm/h 时，水分补偿比例平均值为0.52%，当雨强大于 10 mm/h 时，水分补偿比例平均值提高至 2.99%，最高值可达到 4.94%。

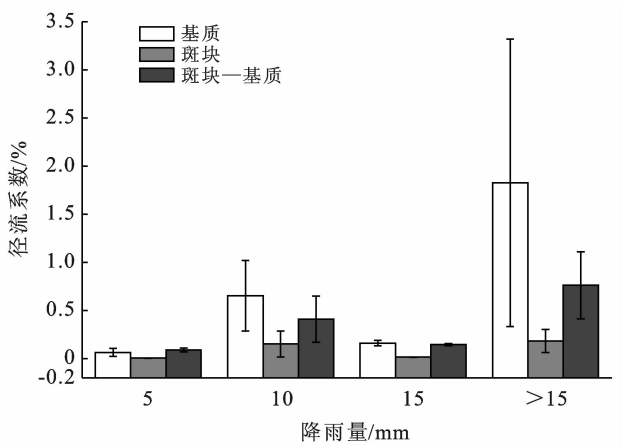


图 4 3 种小区类型径流系数随降雨量变化特征

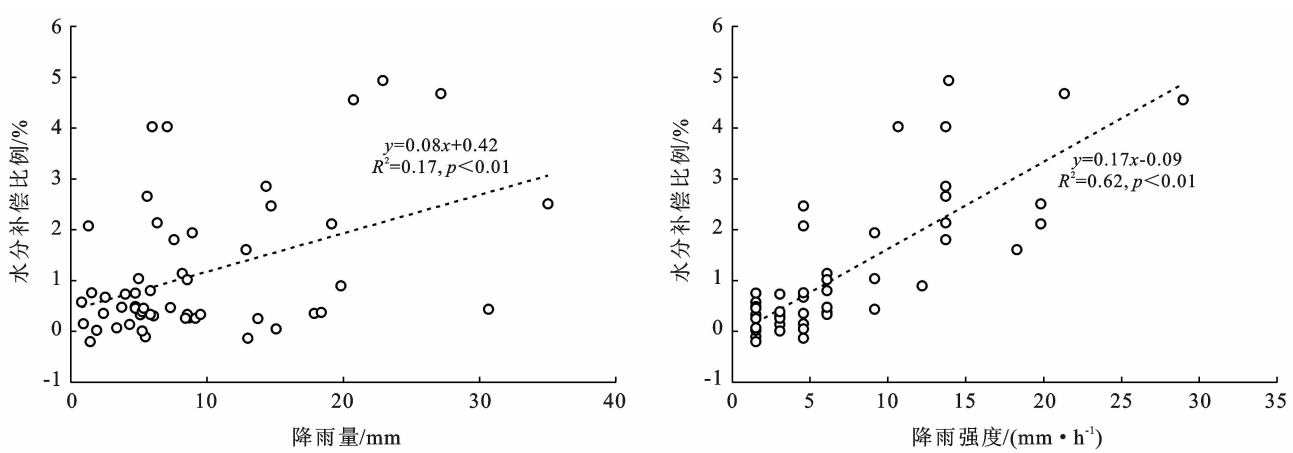


图 5 芨芨草斑块水分补偿比例与降雨量和降雨强度间的关系

3　讨　论

研究期间内青海湖流域芨芨草斑块穿透雨总量占降雨量的比例约为 70.58%,这一结果与油蒿(*Artemisia ordosica*)[22]、小叶锦鸡儿(*Caragana microphalla*)[23]等一些干旱区灌木研究接近[8],说明具有深根性芨芨草草丛具有和灌木类似的冠层结构,产生接近的穿透雨比例。研究结果还指出穿透雨所占比例随降雨量的增加呈先增加后稳定的趋势,稳定趋势值为 73.9%,和观测值接近,说明当降雨量逐渐增大过程中,冠层截留所占比例逐渐降低,当降雨量增大到一定程度时,冠层枝条和叶子到达饱和后对降落到地面的雨水的影响趋于稳定,冠层截留所占比例也逐渐稳定,与半干旱区灌木类似[24-25]。再从穿透雨所占比例和雨强的拟合关系来看(图 3a),芨芨草斑块穿透雨所占比例随雨强的增大而增大,当 $I_{10}>8$ mm/h 后趋于平缓,根据指数函数拟合方程可得穿透雨所占比例极限值接近 70%。杨志鹏等[24]指出毛乌素沙柳灌丛(*Salix psammophila*)穿透雨占降雨量比例随雨强的增大呈线性增加趋势,说明雨强对穿透雨的影响可能与植株的结构和形态有关。芨芨草枝条缺少灌丛的木质部,当发生较大雨强的降雨事件时,雨水较易穿过冠层进入地表,从而使得穿透雨所占比例增加。整体而言,无论从实际观测结果(70.58%)、降雨量增大后穿透雨稳定比例(73.9%),还是降雨强度增大穿透雨稳定比例(70%)来看,芨芨草斑块穿透雨占降雨量比例约为 70%左右。此外,除了降雨等气象因素外,生物因素(如冠幅、枝干倾角、叶面积等)也是影响植物冠层降雨再分配过程的重要因素[8,22],由于数据观测有限,本文未能进行深入分析,这是未来研究需要解决的问题之一。

芨芨草斑块对于地表水分再分配过程具有调控作用。从径流分析结果来看(见表 3,图 4),基质区平均径流系数为 2.08%,远高于芨芨草斑块径流系数,芨芨草斑块水平方向水分补偿比例为 1.13%±1.34%,说明在生态系统尺度,芨芨草斑块会受到来自基质区的径流补偿,且随着降雨量,特别是降雨强度的增大,这种补偿效应越来越明显(见图 5)。这是因为芨芨草斑块相比基质区来说,具有更高的非饱和导水率和孔隙度,以及更低的地形位置[26],因此 Jiang 等[19,27]基于电磁感应方法反演芨芨草斑块土壤水分动态过程时发现,强降雨事件发生后,地表水流会从基质区流向更易入渗的芨芨草斑块,从而增加斑块的土壤含水量。这种植被斑块水流的"源—汇"现象在干旱半干旱区斑块状植被生态系统中十分常见。Cerda[28]研究西班牙一种与芨芨草非常相似的丛状深根性草本(西班牙纸草,*Stipa tenacissima*)时指出,在相对平坦的地形中,地表径流的流向是由四周流向西班牙纸草。Peng 等[29]通过对比观测内蒙古小叶锦鸡儿灌丛斑块与基质(草地)斑块地表径流时发现,基质(草地)斑块的径流系数约为 20.4%,显著高于灌丛斑块,由于基质斑块面积远大于灌丛斑块,因此指出从基质斑块产生的径流水分会被灌丛吸收。而地表水文过程又会对植被斑块的生长起到促进作用。当地表径流遇到草丛(小斑块),径流流速就会变慢,水分就会有更多的时间入渗到草丛中的土壤里面,从而使得草丛土壤中含有更多的沉淀物质及种子而使其变得肥沃,斑块间土壤表层则变得贫瘠。草丛肥沃的土壤为植被与动物提供更多的营养物质,而动植物个体死亡、腐烂后土壤微生物分解过程又为土壤中提供更多的养分[30],随着水分及养分的聚集,植被斑块尺寸逐渐增大,形成一种自我加强的正反馈机制[31]。Ludwig 等[32]提出了一个概念模型,认为地表径流从裸露斑块到植被斑块的再分配过程是干旱区关键的水文过程之一,它可以增加水分聚集及水分利用效率,增大初级生产力,降低水分损失,带状斑块较点状斑块径流截持率增加约 8%,植物生产力提高近 10%。水分与沉淀物从裸露斑块向植被斑块的空间转化可以提高系统的恢复力及驱动植被格局的形成[33]。因此,深根性芨芨草斑块通过影响地表径流再分配,使得水分与养分从基质区流向斑块区,从而促进斑块的维持与生长。

4　结　论

本文通过野外试验观测研究了青海湖流域芨芨草斑块群落降雨再分配及地表径流过程,主要得到以下结论:

(1) 芨芨草斑块穿透雨占降雨量比例为 70.58%,变化范围为 39.71%～90.41%,穿透雨主要受降雨量、雨强和历时的影响,芨芨草斑块对降雨再分配过程的影响和多数干旱区灌木相似;

(2) 芨芨草斑块平均径流系数为 0.45%,明显低于基质区(2.08%),芨芨草斑块水平方向水分补偿比例为 1.13%±1.34%,且随着降雨量和降雨强度增加而增大,最高可达到 4.94%,说明在生态系统尺度范围内,芨芨草斑块会受到来自基质区的径流补偿。

[参　考　文　献]

[1] Deblauwe V, Barbier N, Couteron P, et al. The global biogeography of semi-arid periodic vegetation patterns

[J]. Global Ecology and Biogeography, 2008,17(6):715-723.

[2] Getzin S, Yizhaq H, Bell B, et al. Discovery of fairy circles in Australia supports self-organization theory [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016,113(13):3551-3556.

[3] Kéfi S, Rietkerk M, Alados C L, et al. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems [J]. Nature, 2007,449(7159):213-218.

[4] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, et al. Early-warning signals for critical transitions [J]. Nature, 2009,461(7260):53-59.

[5] Barbosa-Briones E, Cardona-Benavides A, Reyes-Hernández H, et al. Ecohydrological function of vegetation patches in semi-arid shrublands of Central Mexico [J]. Journal of Arid Environments, 2019,168:36-45.

[6] Sheffer E, von Hardenberg J, Yizhaq H, et al. Emerged or imposed: A theory on the role of physical templates and self-organisation for vegetation patchiness [J]. Ecology Letters, 2013,16(2):127-139.

[7] Muvengwi J, Mbiba M, Ndagurwa H G T, et al. Pulsing hydrology and topography determine the structure and spatial distribution of Cubitermes mounds in a savanna ecosystem [J]. Catena, 2016,145:99-106.

[8] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Baldi G. Interception, throughfall and stemflow partition in drylands: Global synthesis and meta-analysis [J]. Journal of Hydrology, 2019,568:638-645.

[9] Llorens P and Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe [J]. Journal of Hydrology, 2007,335:37-54.

[10] 赵明,杨晓楠,陈攀宇,等.灌木斑块格局对产流及产沙过程的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):735-743.

[11] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, et al. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes [J]. Ecology, 2005,86(2):288-297.

[12] 李小雁.干旱地区土壤—植被—水文耦合、响应与适应机制[J].中国科学(地球科学),2011, 41(12):1721-1730.

[13] 杜建会,严平,董玉祥.干旱地区斑块状植被格局形成的水分驱动机制及其研究进展[J].生态学杂志,2012,31(8):2137-2144.

[14] Merino-Martín L, Breshears D D, Moreno-de Las Heras M, et al. Ecohydrological source-sink interrelationships between vegetation patches and soil hydrological properties along a disturbance gradient reveal a restoration threshold [J]. Restoration Ecology, 2012,20(3):360-368.

[15] 吴珍兰,卢生莲.论世界芨芨草属(禾本科)的地理分布[J].植物分类学报,1996,34(2):152-161.

[16] 陈桂琛,彭敏.青海省芨芨草草原的群落特征及其分布规律[J].西北植物学报,1993,13(2):154-162.

[17] 李凤霞,伏洋,杨琼,等.环青海湖地区气候变化及其环境效应[J].资源科学,2008,30(3):348-353.

[18] Xin H. A green fervor sweeps the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science, 2008,321(5889):633-635.

[19] Jiang Zhiyun, Li Xiaoyan, Wu Huawu, et al. Using electromagnetic induction method to reveal dynamics of soil water and salt during continual rainfall events [J]. Biosystems Engineering, 2016,152:3-13.

[20] 张法伟,郭竹筠,林丽,等.青海湖芨芨草干草原浅层土壤温度和导温率的基本特征[J].中国农业气象,2012,33(1):66-70.

[21] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Florio E L, et al. Interception loss, throughfall and stemflow by Larrea divaricata: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes [J]. Ecological Research, 2019,34(6):753-76412.

[22] 李柳,李小雁,蒋志云,等.毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛穿透雨量特征及影响因素[J].中国沙漠,2014,34(4):1031-1036.

[23] 李衍青,张铜会,赵学勇,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿灌丛降雨截留特征研究[J].草业学报,2010,19(5):267-272.

[24] 杨志鹏,李小雁,孙永亮,等.毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征[J].水科学进展,2008,19(5):693-698.

[25] 彭海英,李小雁,童绍玉.内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响[J].生态学报,2014,34(9):2256-2265.

[26] Jiang Zhiyun, Li Xiaoyan, Wei Junqi, et al. Contrasting surface soil hydrology regulated by biological and physical soil crusts for patchy grass in the high-altitude alpine steppe ecosystem [J]. Geoderma, 2018, 326:201-209.

[27] 蒋志云,李小雁,张思毅,等.基于电磁感应成像植被斑块土壤水盐效应研究[J].生态学报,2019,39(24):9188-9199.

[28] Cerda A. The effect of patchy distribution of Stipa tenacissima L on runoff and erosion [J]. Journal of Arid Environments, 1997,36(1):37-51.

[29] Peng Haiying, Li Xiaoyan, Li Guangyong, et al. Shrub encroachment with increasing anthropogenic disturbance in the semiarid Inner Mongolian grasslands of China [J]. Catena, 2013,109:39-48.

(下转第 47 页)

tion, 2016,90(3):956-970.

[2] 王甜甜,赵伟,王利明,等.不同土地利用类型土壤微生物群落特征及其影响因素[J].环境污染与防治,2019,41(9):1082-1087.

[3] 葛磊,李娟,彭飚.鄂尔多斯砒砂岩微观结构特征研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2019(8):36-42.

[4] 李传福,刘阳,党晓宏,等.鄂尔多斯砒砂岩区生态恢复研究进展[J].内蒙古林业科技,2019,45(1):49-52.

[5] 姚宝辉,王缠,张倩,等.甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化[J].水土保持学报,2019,33(3):138-145.

[6] Dilly O, Munch J C. Ratios between estimates of microbial biomass content and microbial activity in soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998,27(4):374-379.

[7] Somova L A, Pechurkin N S. Functional, regulatory and indicator features of microorganisms in man-made ecosystems [J]. Advances in Space Research, 2001,27(9):1563-1570.

[8] 王宝荣,杨佳佳,安韶山,等.黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2018,29(1):247-259.

[9] 郑周敏.黄土高原不同封育年限草地土壤理化和生物学性质变化[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[10] 沈萍,陈向东.微生物学实验[M].北京:高等教育出版社,2007.

[11] 赵兰坡,姜岩.土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J].土壤通报,1986(3):138-140.

[12] 王荫槐.土壤肥料学[M].北京:农业出版社,1992.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[14] 王富延.分析转基因大豆种植对根际土壤酶活性和养分的影响[J].种子科技,2019,37(11):7-8.

[15] 陈正兴,高德新,张伟,等.黄土丘陵沟壑区不同坡向撂荒草地植物群落种群空间格局[J].应用生态学报,2018,29(6):1846-1856.

[16] 张冰.干扰对植物群落组成及多样性的影响[J].河南农业大学,2018,455(3),49-50.

[17] 杨婷.坡位对土壤微生物特征与生态化学计量特征的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[18] 江聪,税伟,简小枚,等.西南喀斯特退化天坑负地形倒石坡的土壤微生物分布特征[J].生态学报,2019,39(15):5642-5652.

[19] 邵宝林,龚国淑,张世熔,等.横断山北部高山区不同生态条件下土壤微生物数量及其与生态因子的相关性[J].生态学杂志,2006,25(8):885-890.

[20] 张萍,刀志灵,郭辉军,等.高黎贡山不同土地利用方式对土壤微生物数量和多样性的影响[J].植物分类与资源学报,1999,21(S1):84-89.

[21] Jia Binghao, Wang Yuanyuan, Xie Zhenghui. Responses of the terrestrial carbon cycle to drought over China: Modeling sensitivities of the interactive nitrogen and dynamic vegetation[J]. Ecological Modelling, 2018,368:52-68.

[22] 贾昭,简春霞,熊沛枫,等.黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系[J].水土保持研究,2020,27(1):319-327.

[23] 任佐华,张于光,李迪强,等.三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量[J].生态学报,2011,31(11):3232-3238.

[24] Jin Yinghua, Zhang Yingjie, Xu Zhiwei, et al. Soil microbial community and enzyme activity responses to herbaceous plant expansion in the Changbai Mountains tundra, China [J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(6):985-1000.

(上接接 14 页)

[30] Ludwig J A, Wiens J A, Tongway D J. A scaling rule for landscape patches and how it applies to conserving soil resources in savannas [J]. Ecosystems, 2000,3(1):84-97.

[31] Cammeraat L H, Imeson A C. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain [J]. Catena, 1999,37(1):107-127.

[32] Ludwig J, Tongway D, Hodgkinson K, et al. Landscape ecology, function and management: Principles from Australia's rangelands[J]. Journal of Applied Ecology, 1996,34(5):1323-1324.

[33] Bestelmeyer B T, Ward J P, Havstad K M. Soil-geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotones [J]. Ecology, 2006,87(4):963-973.