

长沙地区樟树林穿透水空间变异及稳定同位素特征

戴军杰¹, 章新平^{1,2}, 罗紫东¹, 王锐¹, 贺新光^{1,2}, 关华德³

(1.湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081; 2.湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室,长沙 410081; 3.College of Science and Engineering, Flinders University, Adelaide,SA 5001)

摘要:于2018年4月至2019年3月在长沙地区典型樟树林收集降水、穿透水和相应的冠层信息,分析穿透水量的空间变异及穿透水稳定同位素的特征,旨在揭示林冠层水文过程,为林地水文生态系统的科学管理提供参考。结果表明:樟树林下总穿透水量为340.1 mm,占林外总降水量的71.2%;受观测点距树干距离和冠层叶面积指数等因素的综合影响,穿透水量具有较大的空间变异,且在时间变化上相对稳定。分析表明,研究区穿透水量的空间变异系数随降水量增加而减小,体现了降水特征对穿透水空间变异的重要影响;相对穿透水量而言,穿透水稳定同位素组成受冠层结构和大气条件的影响较小,其空间变异较小,在时间变化上不稳定;大部分降水事件中穿透水稳定同位素较降水稳定同位素富集,但其平均值之间不具有显著性差异,说明穿透水在形成过程中经历了较弱的蒸发作用;穿透水与降水中稳定同位素和过量氘的偏离还暗示了冠层具有选择性穿透效应。

关键词:樟树; 穿透水; 空间变异; 稳定同位素; 降水再分配

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0291-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.043

Spatial Variation and Stable Isotopic Characteristic of Throughfall Under *Cinnamomum camphora* Woods in Changsha

DAI Junjie¹, ZHANG Xinping^{1,2}, LUO Zidong¹, WANG Rui¹, HE Xinguang^{1,2}, GUAN Huade³

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Hunan Normal University,

Changsha 410081; 3.College of Science and Engineering, Flinders University, Adelaide, SA 5001)

Abstract: In order to reveal the hydrological process of the forest canopy and provide a reference for the scientific management of forest hydrological ecosystem, precipitation, throughfall, and canopy information were collected from typical *Cinnamomum Camphora* woods during April 2018 to March 2019 in Changsha to study the spatial variability of throughfall and the characteristic of stable isotopes in throughfall. The results showed that the total throughfall under the canopy was 340.1 mm, accounting for 71.2% of the total precipitation outside the forest; comprehensively affected by the canopy structure including the distance from tree trunk and the leaf area index. The throughfall presented great spatial variability and stable temporal variability. The correlation analysis showed that the coefficient of spatial variability decreased with the increase of precipitation, reflecting the important influence of precipitation characteristics on the spatial variation of throughfall. Compared with the amount of throughfall, the stable isotopic compositions in throughfall were hardly affected by canopy structure and atmospheric conditions, not obvious in spatial variation, and not stable in temporal variation. In most precipitation events, stable isotopes in throughfall were richer than those in precipitation, and there was no significant discrepancy between the mean values of them, indicating that throughfall underwent weak evaporation in its formation process. The deviation between the stable isotopes and d in throughfall and those in precipitation suggested that the canopy had the selective penetrating effect.

Keywords: *Cinnamomum camphora*; throughfall; spatial variation; stable isotopes; precipitation redistribution

收稿日期:2019-09-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41571021)

第一作者:戴军杰(1995—),男,在读硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail:473995984@qq.com

通信作者:章新平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事全球气候变化和水文同位素研究。E-mail:zxp@hunnu.edu.cn

林木冠层对降水的截留以及林下穿透水的水文学和生态学意义一直是生态水文领域研究的热点^[1]。林冠的空间异质性及对降水拦截的功能使得降水转化成穿透水的比例在空间上分布不均,这不仅改变了林下水分输入的分布格局,也对林下土壤水分迁移、养分循环和植物生长等一系列生态水文过程造成重大的影响^[1-2]。因此,对穿透水进行定性、定量分析,可为开展精细化的森林生态水文影响评价和森林生态系统保护提供理论支持^[2]。

研究^[3-4]表明,林下穿透水量存在空间变异,其影响因素主要包括冠层结构特征(生物因素)和大气条件(非生物因素)。通常,观测点距树干距离(反映冠层结构复杂程度)及冠层叶面积指数(反映林分生长状况)被认为是影响穿透水量空间分布的重要冠层结构因子^[1-2]。如盛后财等^[1]和裴承敏等^[5]认为,穿透水量随距树干距离的增加而增加;Sato等^[6]和Fan等^[7]发现,穿透水量在距树干越近的位置越大。然而,Keim等^[8]却认为,林下穿透水量与距树干距离没有显著关系。不同的观测结果可能与不同林地类型冠层结构差异大有关。时忠杰等^[9]发现,叶面积指数是影响穿透水量空间变异最大的冠层结构因子。大气条件除降水特征(降水量和降水强度等)外,风速和风向也会通过改变降水角度和冠层枝叶摆动影响穿透水的空间分布^[4]。当大气条件相同时,冠层结构特征是决定大气降水再分配和空间变异的重要因素^[5]。然而,仅通过对穿透水量空间变化的研究难以深入理解降水在冠层再分配过程的具体细节。水稳定同位素(²H和¹⁸O)作为天然的示踪剂能准确标记水体来源及进入水循环的路径,目前已被广泛运用于研究林冠层的水文过程^[10]。大多数学者^[11-12]认为,降水经过植被截留后形成的穿透水的稳定同位素较降水稳定同位素富集;也有学者^[13]认为,当穿透水量在一定范围时,穿透水稳定同位素较降水稳定同位素贫化。此外,穿透水与水汽或冠层截留水的混合交换也被认为是引起穿透水稳定同位素相较于降水稳定同位素组成偏离的重要因素^[14]。综上,穿透水稳定同位素组成可能受多种因素的综合影响。樟树是亚热带地区重要的经济树种,对季节性干旱的敏感性较强,耐旱性差,因此有必要研究樟树林地的生态水文过程。目前,依靠传统方法对樟树林冠层降水再分配的研究已有较多报道^[15],但应用稳定同位素技术研究冠层水文过程的成果相对较少,尤其缺乏对穿透水稳定同位素组成与穿透水量空间变异的比较以及穿透水稳定同位素影响机理的探讨。

本研究以长沙地区典型樟树林为研究对象,通过在样地收集降水、穿透水和相应的冠层信息,分析样

地中穿透水量与穿透水稳定同位素空间变异及其影响因素、穿透水与降水稳定同位素组成的差异及其影响因素,旨在深入了解冠层结构与降水特征如何影响穿透水量空间变异,同时利用穿透水稳定同位素特征揭示林冠层水文过程,以期为该区林地水文生态系统的科学管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长沙地区位于亚热带季风区,气候温和湿润,四季分明。夏季盛行西南和东南季风,冬季盛行偏北风。多年平均气温 17.4℃,多年平均降水量 1 447 mm,多年平均蒸发量 902 mm。

樟树林位于湖南省长沙市望城区八曲河村(28°22′09″N,112°45′43″E),为低丘坡面,地势较为平坦,坡度<3°,海拔 50 m 左右。地带性土壤为红壤,pH 为 6.0~7.0。在 0—130 cm 土壤剖面上,粉粒占 70%以上,质地为粉砂质黏壤土,土壤容重在 1.16~1.40 g/cm³范围,随土层深度增加而增大,土壤孔隙度为 47.2%~56.2%,随土层深度增加而减小。林内 90%以上树种为樟树(*Cinnamomum camphora*),其根系集中分布在 1 m 深度内,水平根系尤为发达,平均树龄约 13 年,平均树高约 9 m。林内伴生有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolate*)等,地面草本植物稀少。林地的平均郁闭度在 0.8 以上。

1.2 样品采集与分析

在樟树林中选取典型地段作为样地,面积为 20 m×40 m。于 2018 年 4 月至 2019 年 3 月在样地中以棋盘式随机布设 15 个直径 20 cm 的穿透水收集器,相邻收集器的间隔为 2~4 m,同时在林外布设 1 个直径 20 cm 的降水收集器,分别对穿透水和林外降水进行观测。所有收集器上端截面均高出地面 40 cm,以避免雨滴在地面击溅的干扰。根据有效降水事件的定义,将降水间隔时间超过 4 h 的降水事件划分为 2 场不同降水^[1]。在每次降水结束后 4 h 内,用气象专用雨量杯测定各收集器中穿透水量和林外降水量。为了防止水样蒸发,测完水量的样品被迅速装入 30 mL 聚乙烯样品瓶内,然后密封、编号、低温(4℃)保存,待测稳定同位素。

观测期间共记录了 25 次有效降水事件,每月平均 2 次,按时间顺序依次以 S₁、S₂、…、S₂₅ 等表示,每次降水事件均测定林外降水量、穿透水量和降水历时等。对其中 24 次林外降水和穿透水进行了稳定同位素的测定(S₃的水同位素缺测),共计穿透水样 324 个(因部分穿透水收集器被风吹倒而未取样),林外降水样 24 个。所选水样经过滤后均利用气—液两用型水稳定同位素分析仪(DLT—IWA—35EP,LGR,美国)测定氢、氧稳定同位

素。测试的稳定同位素丰度用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)稳定同位素比率的千分差值表示:

$$\delta_{\text{sample}} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中: R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别代表水样和标准平均海洋水中稳定同位素比率($^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。本文有关降水稳定同位素和穿透水稳定同位素的平均值均为算术平均值。

1.3 距树干距离和叶面积指数的测定

距树干距离(h)为各穿透水收集器与最近一棵树树干的水平距离,利用卷尺测定。各穿透水收集器上方的叶面积指数(LAI, m^2/m^2)基于数字冠层摄影技术获得。由于樟树为常绿阔叶树种,LAI全年变化不大,故观测期间某一天(天气为阴天、微风)冠层的LAI基本能反映观测期LAI的平均状况。首先通过数码相机获取冠层图像,然后在Matlab软件中运行特定程序获取冠层间隙率(G_c ,%)、植物叶片投影盖度(f_i ,枝和叶的面积占林地面积的比,不包括冠层间隙)和冠层覆盖度(f_c ,冠层投影面积占林地面积的比)等参数,进而推算LAI^[16]:

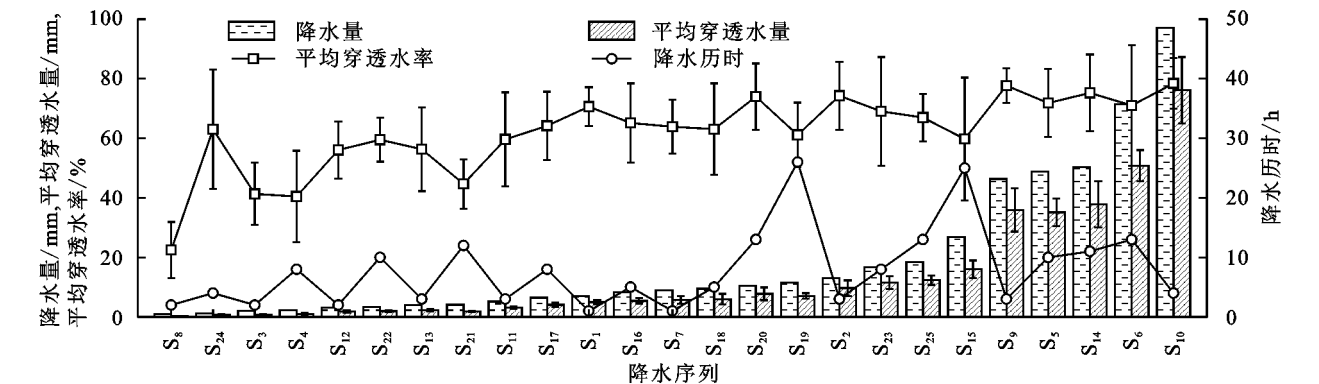
$$\text{LAI} = -f_c \times \ln(G_c)/k$$
$$G_c = 1 - f_i/f_c$$

式中: k 为天顶方位的消光系数,本文取 $0.5^{[16]}$ 。

1.4 穿透水量和穿透水稳定同位素值的标准化

为避免受个别极值或缺测数据的影响,分别对观测的降水事件中各收集器的穿透水量和穿透水稳定同位素组成进行标准化计算^[8,14]:

$$U_i = (X_i - \bar{X})/\sigma$$



注:图中误差线为标准差。

图 1 25 次降水事件中降水量、平均穿透水量、平均穿透水率和降水历时的变化

TF 、 R_{TF} 和穿透水量的变异系数 CV_{TF} (反映各次降水事件中不同收集器穿透水量的空间变异程度)与 P 的关系体现了穿透水在降水再分配中的贡献。如图 2 所示,样地中 TF 与 P 之间呈显著的正相关($\alpha < 0.001$)。根据拟合方程,当 $P > 1.3\text{ mm}$ 时, $TF > 0$,理论上林下已产生穿透水。 R_{TF} 与 P 之间呈显著的对数函数关系($\alpha < 0.001$),即随 P 增大, R_{TF}

式中: X_i 为某次降水事件中第 i 个收集器的穿透水量(mm)或穿透水稳定同位素值(‰); $\bar{X}$ 为该次降水事件 15 个收集器穿透水量的平均值(mm)或穿透水稳定同位素的平均值(‰); σ 为 15 个收集器穿透水量的标准差(mm)或穿透水稳定同位素的标准差(‰); U_i 为第 i 个收集器对应的标准化穿透水量或穿透水稳定同位素值。

文中要素平均值之间的显著性差异及要素间相关系数的显著性均采用 t 检验方法。

2 结果与分析

2.1 降水量与穿透水量的特征及关系

图 1 为观测期间的 25 次降水事件中林外降水量(P)、降水历时(T)、15 个收集器的平均穿透水量(TF)和平均穿透水率(R_{TF})的变化,降水序列按 P 由小到大的顺序排列。根据统计,降水事件中 P 的变化范围为 $1.0 \sim 97.1\text{ mm}$,总降水量为 477.6 mm , T 基本在 12 h 内,降水强度为 $0.3 \sim 24.3\text{ mm/h}$ 。 TF 的变化范围为 $0.2 \sim 76.2\text{ mm}$,该值与其标准差均随 P 的增大而增大。观测期间的总穿透水量为 340.1 mm ,占同期林外总降水量的 71.2% 。 R_{TF} 的变化范围为 $22.5\% \sim 78.4\%$,亦随着 P 的增大呈增加趋势。然而,出现在 2019 年 3 月 16 日 P 为 1.2 mm 的小降水事件(S_{24})中, R_{TF} 达 63.0% ,明显高于同等降水强度下的 R_{TF} 。实际观测中发现,樟树林在春季会出现大面积新老叶替换现象,从而降低了林冠层的截留能力,使得该时期的小降水事件中出现了较大的穿透水率。同样的结果也在 2018 年 4 月 29 日 P 为 7.0 mm 的小降水(S_1)中出现。

逐渐增大并趋于稳定。表明当 P 较小时林冠层截留量相对较大,而当 P 达到一定阈值且超过冠层的最大截留能力时,林冠层截留水趋于饱和, R_{TF} 的增幅随降水量的增加而减缓。 CV_{TF} 的变化范围在 $10.3\% \sim 38.1\%$,且与 P 呈显著的正对数函数关系($\alpha < 0.01$),即随 P 的增大, CV_{TF} 逐渐降低,说明穿透水的空间变异程度随降水量增大而减小,受冠层结构

的影响程度逐渐减弱。

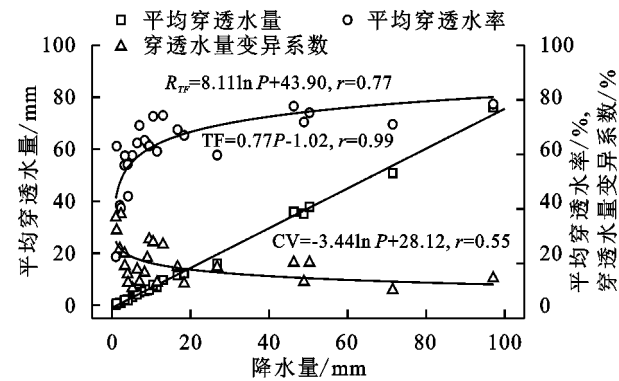


图 2 平均穿透水量、平均穿透速率和
穿透水量变异系数与降水量的关系

2.2 穿透水量的空间变异

为了揭示研究区穿透水量的空间变化特征,按 1.4 节介绍的方法对 25 次降水事件中每个收集器的

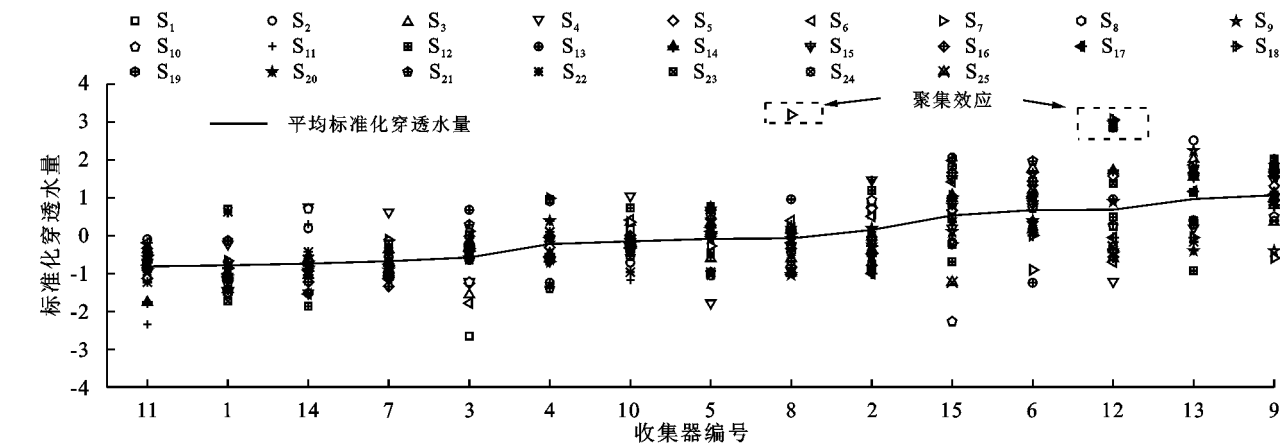


图 3 不同收集器标准化穿透水量的空间变异

由于穿透水量的空间变异与冠层结构之间存在紧密联系,本研究分析了 U_{TF} 与 h 和 LAI 的关系。由图 4 可知, U_{TF} 与 h 呈显著正相关 ($\alpha < 0.001$), 且与 LAI 呈显著负相关 ($\alpha < 0.001$)。根据拟合曲线, U_{TF} 随 h 的增大而增大, 随 LAI 的增大而减小, 说明越密集的冠层对降水的截留作用越大, 穿透水越少。通常, 距树干越近, 树干的分枝越多、越粗大, 且叶面积指数也较大, 从而穿透水量减少; 反之, 距树干越远, 树干的分枝越少、越细, 且叶面积指数相对也较小, 从而穿透水量增加。另外, 部分枝条下垂也增加了树冠外缘汇集降水的作用。

尽管 h 和 LAI 分别与 U_{TF} 存在显著的线性相关关系, 但 h 和 LAI 之间不具有显著线性相关性 ($\alpha > 0.05$)。综合考虑 h 和 LAI 的影响, U_{TF} 依 h 和 LAI 的多元线性回归分析为:

$$U_{TF} = 3.10 + 0.38h - 1.19LAI, n = 334, r = 0.52$$

方程的复相关系数达到 0.52 ($\alpha < 0.001$), 分别强于两因子单独与 U_{TF} 的相关性。表明综合考虑 h 和

穿透水量进行标准化处理(图 3)。不同收集器平均标准化穿透水量 ($\bar{U}_{TF}$) 的变化范围为 $-0.81 \sim 1.06$, 它们之间基本均具有显著差异 ($\alpha < 0.05$); 各收集器标准化穿透水量 (U_{TF}) 的离散度均偏小, 平均标准差为 0.75, 明显小于标准化序列的标准差 (1.0)。该结果表明, 穿透水量具有空间变异大、时间变化相对稳定的特征。例如, 图 3 中第 11 个收集器的 $\bar{U}_{TF}$ 最小, 仅 -0.81 , 该收集器 25 次降水事件中的 U_{TF} 均低于各收集器穿透水量的平均水平。出现在第 9 个收集器的 $\bar{U}_{TF}$ 最大, 达 1.06, 该收集器的 U_{TF} 大部分高于各收集器穿透水量的平均水平。观测中还发现, 第 8 个收集器在 S_7 , 第 12 个收集器在 S_{14} 、 S_{18} 和 S_{20} 均出现了穿透水量大于降水量的现象, 即穿透水的聚集效应, 可能原因是这 2 个收集器上方的冠层受自身结构或风向、风速等气象因素的作用恰好形成锥形, 更容易在此处汇集降水。

LAI 2 个因素的影响能更好地反映樟树林穿透水量的空间变异。

2.3 穿透水稳定同位素组成的空间变异

观测期间, 林外降水中 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 $-94.36\text{‰} \sim 47.50\text{‰}$ 和 $-13.00\text{‰} \sim 5.11\text{‰}$, 平均值 $\pm$ 标准差分别为 $-33.47\text{‰} \pm 33.67\text{‰}$ 和 $-6.03\text{‰} \pm 3.87\text{‰}$ 。穿透水中 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 $-91.11\text{‰} \sim 40.42\text{‰}$ 和 $-12.26\text{‰} \sim 3.59\text{‰}$, 平均值 $\pm$ 标准差分别为 $-32.60\text{‰} \pm 32.56\text{‰}$ 和 $-5.98\text{‰} \pm 3.65\text{‰}$ 。穿透水稳定同位素比率的变化范围和离散度均较降水稳定同位素比率更小, 平均值更大。图 5 为林外降水和穿透水中 δ^2H 与 $\delta^{18}O$ 的散点分布及平均值状况。从图 5 可以看出, 穿透水与降水中 δ^2H 和 $\delta^{18}O$ 的散点分布相互较接近, 其平均值之间不存在显著性差异 ($\alpha > 0.05$)。穿透水中 $\delta^2H - \delta^{18}O$ 的线性关系即穿透水线 (TFWL, $\delta^2H = 8.72\delta^{18}O + 19.55$) 与降水中 $\delta^2H - \delta^{18}O$ 的线性关系即区域大气水线 (LMWL, $\delta^2H = 8.47\delta^{18}O + 17.63$) 较为接近, 这与降

水转化为穿透水的过程中经历的同位素分馏作用相对较弱有关。但TFWL的斜率与截距分别大于

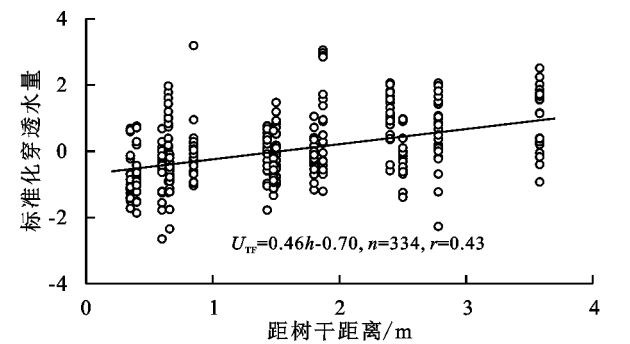


图4 标准化穿透水量与距树干距离和叶面积指数的关系

与降水稳定同位素的降水量效应相似,穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均与穿透水量呈显著负相关($\alpha < 0.001$),说明研究区穿透水稳定同位素存在显著的水量效应。

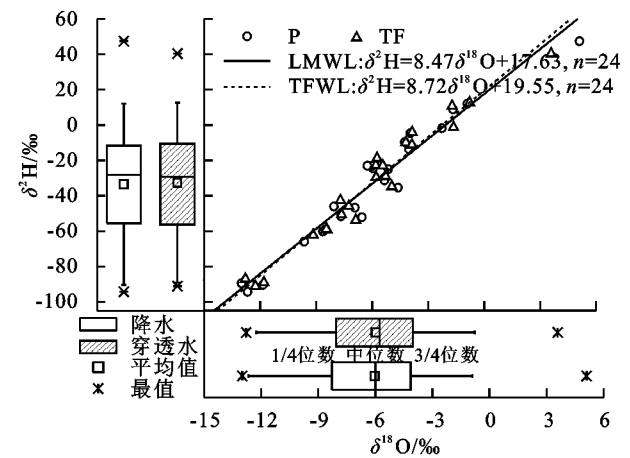


图5 林外降水和穿透水中 $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ 的散点分布及水线方程

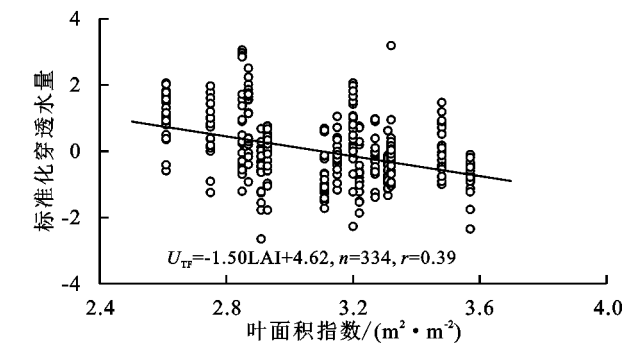
为了对穿透水稳定同位素组成与穿透水量的空间变异进行比较,对24次降水事件中每个收集器穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 进行标准化处理(图6)。不同收集器平均标准化穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ (分别以 $\bar{U}_{\text{H}_2}$ 和 $\bar{U}_{\text{O}_{18}}$ 表示)的变化范围分别为 $-0.43\sim 0.74$ 和 $-0.42\sim 0.29$,明显小于 $\bar{U}_{\text{TF}}$ 的变化范围,仅个别收集器的 $\bar{U}_{\text{H}_2}$ 之间或 $\bar{U}_{\text{O}_{18}}$ 之间具有显著差异($\alpha < 0.05$);各收集器标准化穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ (U_{H_2} 和 $U_{\text{O}_{18}}$)的离散度均偏大,标准差均为0.95,明显大于 $\bar{U}_{\text{TF}}$ 的标准差,并接近于1。这说明穿透水稳定同位素组成具有空间变异小、时间变化上不稳定的特征。

穿透水稳定同位素组成的空间变异特征与冠层结构、降水量及穿透过程等因素对其影响较小有关。与标准化穿透水量不同, U_{H_2} 和 $U_{\text{O}_{18}}$ 分别与 h 和与LAI之间均不具有显著相关性($\alpha > 0.05$);穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变异系数与降水量之间均呈弱负相关。

2.4 穿透水稳定同位素与降水稳定同位素组成差值

穿透水稳定同位素与降水稳定同位素组成的偏

LMWL的斜率与截距,可能原因是降水在穿透过程除受蒸发作用外还具有冠层选择性穿透效应。



差一定程度上反映穿透水是否经历了蒸发、冠层选择性透过和混合交换等过程。除 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 外,过量氘($d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$)的引入有利于深入理解穿透水形成过程中稳定同位素值的变化。图7为穿透水与降水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的差值($\Delta\delta^2\text{H}$ 、 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 Δd)与TF的散点分布。 $\Delta\delta^2\text{H}$ 、 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 Δd 的变化范围分别为 $-7.07\%\sim 4.29\%$ 、 $-1.52\%\sim 0.62\%$ 和 $-4.49\%\sim 5.08\%$;平均值分别为0.87%、0.05%和0.47%;出现 >0 的频率分别为83.3%、75.0%和62.5%。说明穿透水稳定同位素总体上较降水稳定同位素富集,穿透水中 d 总体上较降水中 d 偏大。

当 $TF < 10\text{ mm}$ 时, $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 均出现 >0 或 <0 的结果,变化范围和离散度均偏大,极差分别为11.36%和2.14%,标准差分别为2.73%和0.52%,说明小降水事件中穿透水稳定同位素变化大且不稳定;当 $TF \geq 10\text{ mm}$ 时, $\Delta\delta^2\text{H}$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 均 >0 ,变化范围和离散度均偏小,极差分别为3.55%和0.45%,标准差分别为1.27%和0.14%,说明大降水事件中穿透水稳定同位素变化小且相对稳定。 $\Delta\delta^2\text{H}$ 、 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 Δd 均随穿透水量的增加逐渐减小最终趋于0,表明穿透水稳定同位素组成受外部环境条件的影响逐渐减弱,而与降水稳定同位素组成保持一致。

3 讨论

3.1 穿透水量空间变异的可能影响因素

大气降水到达冠层进行再分配时,一部分降水被截留后通过冠层蒸发返回大气,小部分形成树干茎流汇集到植物根处供水分利用,而大部分则以穿透水的形式降落到地面进入土壤。一般,TF与P之间具有显著的线性关系,TF随P增加而增加。但由于不同区域、不同林地类型冠层截留能力的差异性,降水转化为穿透水的比例并不一致,产生穿透水的临界降水量也存在明显差异。通过对不同地区、不同林地类型TF与P之间的关系比较(表1)发现,产生穿透水的临界降水量为0.1~4.6 mm。然而,根据所有降水事

件建立的 $TF-P$ 回归方程可能会高估临界降水量,这是因为较大的降水事件必然形成穿透水,该类降水参与回归拟合时会使方程的斜率变大、截距变小,而导致计算的临界降水量偏高。本研究中,仅以 $P < 10\text{ mm}$ 的降水事件建立的 $TF-P$ 回归方程为:

$$TF=0.70P-0.48,n=14,r=0.99$$

二者间的相关系数通过了 0.001 的显著性检验,产生穿透水的临界降水量为 0.7 mm,这与实际观测的结果较一致。观测期间,当降水事件大小约 1.0 mm 时就可以观察到穿透水产生。

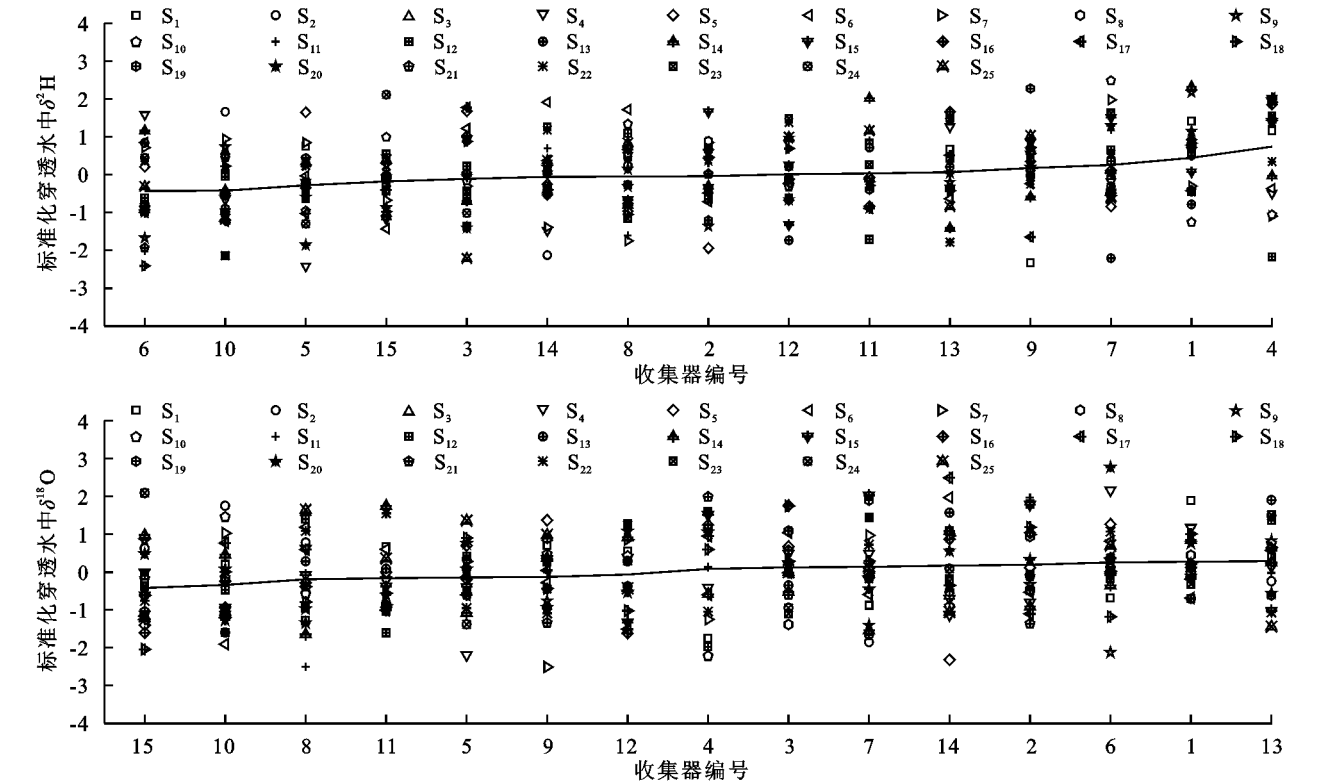
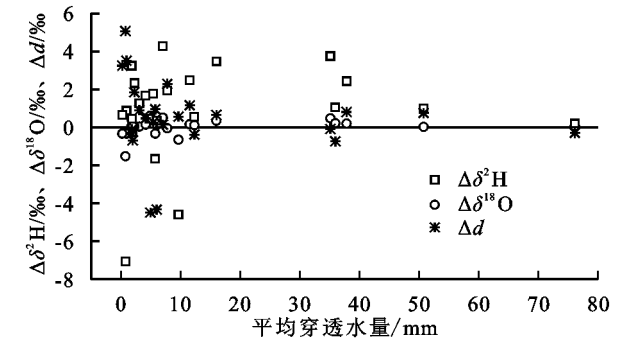


图 6 标准化穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间变异



注: $n=24$ 。
图 7 穿透水与降水中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 的差值($\Delta\delta^2\text{H}$ 、 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 和 Δd)与平均穿透水量的散点分布

根据表 1,不同林地类型降水转化为穿透水的比例为 0.74~0.93,基本与郁闭度无关。降水转化为穿透水的比例较低的林地分别为红松和油松;降水转化为穿透水的比例较高的林地类型为樟树,较本文所得到的结果(0.77)明显偏高,这可能与本样地樟树林的 LAI 更大有关。

降水在整个林分冠层的再分配过程是不均匀的,往往会出现穿透水量的空间变异。在 2.2 节的分析中,各穿透水收集器 $\bar{U}_{\text{TF}}$ 的空间变化较大,在所有降水事件中 $\bar{U}_{\text{TF}}$ 间基本均具有显著差异($\alpha < 0.05$)。而各穿透水收集

器 U_{TF} 的离散度均较小,表现出时间变化上相对稳定。在穿透水量空间变异的影响因素分析中, U_{TF} 与 h 和 LAI 分别存在显著正相关和负相关关系,这与盛后财等^[1]的研究结果相近。综合这 2 个因素能够解释 U_{TF} 的 69%,表明 h 和 LAI 是影响穿透水空间变异的重要因素。此外,枝叶倾角、叶片表面性质、枝干粗糙度、冠层厚度、林冠形状等冠层特征也会引起穿透水量的空间变异^[13]。Zhang 等^[4]认为,穿透水量的空间变异除了受冠层结构影响外,还与同期的风速、风向和降水特征(降水量、降水强度和雨滴大小等)等大气条件有关。在图 2 中,樟树林穿透水量的空间变异系数随降水量的增加先快速减小后趋于稳定, $\text{CV}_{\text{TF}} > 30\%$ 的情形均出现在单次降水量为 1.0~2.3 mm 的小降水事件中;而 CV_{TF} 的最小值(10.3%)则出现在单次降水量为 71.5 mm 的强降水事件中。

3.2 穿透水稳定同位素组成空间变异的可能影响因素

与穿透水量相似,穿透水稳定同位素组成也会产生空间变异。但不同之处在于:(1)穿透水稳定同位素组成的空间变异小。表现为不同降水事件中穿透水量的变异系数(平均为 20.4%)远大于穿透水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变异系数(平均为 3.4%和 2.7%)以及

不同收集 $\overline{U}_{TF}$ 的变化范围明显大于 $\overline{U}_{H_2}$ 和 $\overline{U}_{O_{18}}$ 。(2) 穿透水稳定同位素组成的空间变异受叶面积指数、距树干距离和大气条件的影响较小。(3) 穿透水稳定同

位素组成的空间变异不具有时间稳定性,表现为各收集器穿透水稳定同位素值在不同降水事件中的变化无规律性,这与 Allen 等^[10]研究结果一致。

表 1 不同林地穿透水量(TF)与降水量(P)的关系

地区	林地类型	郁闭度	线性回归方程
小兴安岭 ^[17]	红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	0.7	$TF=0.74P-0.06,n=97$
西藏林芝 ^[18]	云杉(<i>Picea asperata</i>)	0.7	$TF=0.86P-3.52,n=71$
湖南长沙城郊 ^[15]	樟树(<i>Cinnamomum camphora</i>)	0.7	$TF=0.93P-2.83,n=165$
山西太岳山 ^[19]	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)	0.8	$TF=0.76P-1.26,n=30$
江苏南京 ^[20]	麻栎(<i>Quercus acutissima</i>)	0.9	$TF=0.83P-0.72,n=47$
福建三明 ^[21]	米槠(<i>Castanopsis carlesii</i>)	0.9	$TF=0.80P-3.66,n=47$
大兴安岭南段 ^[22]	白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	0.7	$TF=0.80P-0.26,n=64$
河北沿坝地区 ^[23]	白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	0.8	$TF=0.80P-1.79,n=15$
祁连山 ^[24]	云杉(<i>Picea asperata</i>)	0.7	$TF=0.91P-1.78,n=15$
重庆缙云山 ^[5]	毛竹(<i>Phyllostachys edulis</i>)	0.7	$TF=0.89P-0.88,n=18$

由于穿透水来源于降水,穿透水稳定同位素组成和变化基本与降水保持一致。受多种因素综合影响,穿透水稳定同位素与降水稳定同位素组成往往发生偏离。本研究中,穿透水稳定同位素较降水稳定同位素总体上更富集,说明降水在穿透过程存在蒸发作用,这与其他的观测结果^[11,25]一致。但穿透水和降水稳定同位素的平均值不存在显著性差异表明,穿透水形成时经历的蒸发较弱,与南方湿润地区林地降水过程中相对湿度大有关。

然而,个别降水事件中穿透水稳定同位素相对降水贫化(图 7),一定程度上说明降水转化为穿透水时存在冠层选择性穿透效应。当降水过程中降水稳定同位素随时间变化逐渐贫化时,由于冠层主要截留前期稳定同位素值较高的降水,这使得大部分具有较低稳定同位素值的降水形成穿透水。根据 d 的变化,如果降水在穿透过程仅受蒸发作用控制,理论上穿透水中 d 较降水中 d 偏小。但本研究的大部分实测结果正好相反,表现为 $\Delta d>0$ 。Xu 等^[11]认为,单次降水中 d 通常逐渐增加,冠层截留作用可能在降水过程的开始阶段和结束阶段较大,而在其他时段较小,从而使得穿透水中 d 较降水中 d 偏大。此外,雨滴与水汽交换也可能影响穿透水稳定同位素组成。但该过程只在相对湿度达 100%且穿透水与水汽稳定同位素值相差较大的条件下易出现,这种情形在湿润地区尤其显著。

4 结论

- (1)樟树林穿透水量约占总降水量的 71.2%,随降水量增加,穿透水量呈线性增加,而穿透水率呈对数函数增加,林地产生穿透水的临界降水量理论上为 0.7 mm。
- (2)穿透水量受距树干距离及叶面积指数等冠层结构的综合影响,具有空间变异较大、时间变化相对

稳定的特征。标准化穿透水量与距树干距离呈显著正相关,与叶面积指数呈显著负相关。穿透水的空间变异还受降水特征的影响,随降水量增加,穿透水量的空间变异系数先快速减小后趋于稳定。

(3)穿透水稳定同位素组成具有空间变异较小、时间变化上不稳定的特征。穿透水与降水稳定同位素组成不存在显著差异性,同时穿透水稳定同位素具有显著的水量效应。

(4)在同位素蒸发分馏作用下,大部分降水事件中穿透水稳定同位素较降水稳定同位素富集;一些降水事件中穿透水稳定同位素相对降水贫化,穿透水中 d 较降水中 d 基本偏大,穿透水线的斜率和截距较区域大气水线偏高,均与冠层的选择性穿透效应有关。

参考文献:

[1] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.

[2] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,等.六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征[J].生态学报,2017,37(10):3471-3481.

[3] Katoa H, Onda Y, Nanko K, et al. Effect of canopy interception on spatial variability and isotopic composition of throughfall in Japanese cypress plantations [J].Journal of Hydrology,2013,504:1-11.

[4] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems [J].Journal of Hydrology,2016,539:406-416.

[5] 裴承敏,王云琦,张守红,等.重庆缙云山毛竹林次降雨再分配特征及穿透雨的空间异质性[J].水土保持学报,2018,32(5):202-207.

[6] Sato A M, Avelar A S, Netto A L C. Spatial variability and temporal stability of throughfall in a eucalyptus plantation in the hilly lowlands of southeastern Brazil [J].Hydrological Processes,2011,25(12):1910-1923.

- [7] Fan J L, Oestergaard K T, Guyot A, et al. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(5): 793-804.
- [8] Keim R F, Skaugset A E, Weiler M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall [J]. Journal of Hydrology, 2005, 314(1/4): 263-274.
- [9] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华山松 (*Pinus armandii*) 林降雨再分配及其空间变异特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 76-85.
- [10] Allen S T, Brooks J R, Keim R F, et al. The role of pre-event canopy storage in throughfall and stemflow by using isotopic tracers [J]. Ecohydrology, 2014, 7(2): 858-868.
- [11] Xu X, Guan H D, Deng Z J. Isotopic composition of throughfall in pine plantation and native eucalyptus forest in South Australia [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 150-157.
- [12] 陶泽, 司炳成, 靳静静. 矮化枣树冠层改变降雨截留历时过程同位素和化学特征 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 189-195.
- [13] 徐振, 安树青, 王中生, 等. 川滇高山栎灌丛冠层穿透水及其稳定同位素组成变化特征 [J]. 资源科学, 2007, 29(5): 129-136.
- [14] Allen S T, Keim R F, McDonnell J J. Spatial patterns of throughfall isotopic composition at the event and seasonal timescales [J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 58-66.
- [15] 赵亮生, 闫文德, 项文化, 等. 樟树人工林林冠截留效应分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(5): 91-95.
- [16] Pekin B, Macfarlane C. Measurement of crown cover and leaf area index using digital cover photography and its application to remote sensing [J]. Remote Sensing, 2009, 1: 1298-1320.
- [17] 及莹, 蔡体久. 小兴安岭原始红松林降雨截留观测及分段模拟 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 41-49.
- [18] 方江平, 项文化, 刘韶辉. 西藏原始林芝云杉林雨季林冠降水分配特征 [J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3679-3687.
- [19] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 [J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653.
- [20] 韩诚, 张金池, 庄义琳, 等. 苏南丘陵区麻栎林冠层水文效应及其影响因素 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2014, 38(2): 93-98.
- [21] 江森华, 吕茂奎, 胥超, 等. 亚热带米槠次生林和杉木人工林林冠截留特征比较 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 116-121.
- [22] 宝虎, 刘殿国, 赵鹏武, 等. 大兴安岭南段白桦林降雨再分配特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 82-87.
- [23] 张宁, 郭宾良, 张国强, 等. 沿坝地区天然次生林对降雨再分配的影响 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 99-102.
- [24] 万艳芳, 刘贤德, 王顺利, 等. 祁连山青海云杉林冠降雨再分配特征及影响因素 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 224-229.
- [25] Sun X C, Onda Y, Hirata A, et al. Effect of canopy openness and meteorological factors on spatial variability of throughfall isotopic composition in a Japanese cypress plantation [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(8): 1038-1049.
- (上接第 273 页)
- [62] Xu C Y, Yu Z H, Li H. The coupling effects of electric field and clay mineralogy on clay aggregate stability [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(5): 1159-1168.
- [63] Li H, Qing C L, Wei S Q, et al. An approach to the method for determination of surface potential on solid/liquid interface: Theory [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, 275(1): 172-176.
- [64] 陈晶晶. 基于表面电场驱动土壤侵蚀理论下的植物篱措施水力侵蚀控制过程研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [65] 张磊, 徐则民, 侯汝儿, 等. 植被发育玄武岩斜坡土体基质吸力及其影响因素 [J]. 山地学报, 2016, 34(5): 513-519.
- [66] 李学恒. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 106-126.
- [67] 张继澍. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 88-89.
- [68] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review [J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29: 189-217.
- [69] Duiker S W, Flanagan D C, Lal R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of south-west Spain [J]. Catena, 2001, 45: 103-121.
- [70] 陈宝强, 张丹, 熊东红, 等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 108-113.
- [71] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- [72] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 100: 34-41.
- [73] Stokes A, Salin F, Kokutse A D, et al. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 107-117.
- [74] De B S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow [J]. Geo-morphology, 2006, 76(1/2): 54-67.