

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2019. 01. 014

强降雨条件下林分阳离子流转公式及应用^{*}

李联地¹, 左万星², 任启文¹, 尤海舟¹, 毕君¹

(1. 河北小五台山森林生态系统定位研究站, 河北省林业科学研究院, 河北 石家庄 050061;

2. 河北省小五台自然保护区管理局, 河北 蔚县 075700)

摘要: 为了定量分析强降雨对不同林分阳离子的影响, 通过野外取样和室内测定收集数据, 编制公式计算降雨再分配过程中的林分阳离子流转量, 并以山涧口流域白桦林、落叶松林和油松林为例, 对降雨及再分配过程中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 7 种阳离子进行测定与分析。结果表明: (1) 降雨输入阳离子排序为, $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$; (2) 白桦林中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Na^+ 处于流失状态; K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态。油松林中 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 处于流失状态; Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态。落叶松林中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 处于流失状态; Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 处于保留积累状态; (3) 流转量公式 $\rho_{穿} = m_{穿} \times v_{穿}$ 和净余量公式 $\rho_{净} = c\rho_{穿} + (1-c)\rho_{降} + \rho_{树} + (\rho_{枯} - \rho_{降}) - \rho_{坡}$ 可以正确分析强降雨及再分配过程中阳离子的流转。

关键词: 强降雨; 阳离子; 净余量; 白桦林; 落叶松林; 油松林

中图分类号: S 715 文献标识码: A 文章编号: 1672-8246 (2019) 01-0082-06

Formulas of Cations Transfer under Heavy Rainfall and its Application

LI Lian-di¹, ZUO Wan-xing², REN Qi-wen¹, YOU Hai-zhou¹, BI Jun¹

(1. Hebei Xiaowutaishan Forest Ecosystem Research Station, Hebei Academy of Forestry Science, Shijiazhuang Hebei 050061, P. R. China;

2. Hebei Xiaowutaishan National Nature Reserve Administration, Yuxian Hebei 075700, P. R. China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the effects of heavy rainfall on soil cations in different stands, relevant data were collected through sampling in the field and indoor measurement, and formulas for calculating the cations transfer in rainfall and redistribution processes were developed. The 7 cations of K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} and Fe^{2+} in rainfall and redistribution processes were measured and analyzed by taking 3 plantations of *Betula platyphylla*, *Larix gmelinii* and *Pinus tabulaeformis* ascases. The results showed that: (1) The cations order by rainfall input was $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$; (2) Mg^{2+} , Fe^{2+} and Na^+ were in a state of loss, while K^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} and Zn^{2+} were in accumulation state in *Betula platyphylla* plantation. Mg^{2+} , K^+ and Na^+ were in a state of loss, while Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} and Zn^{2+} were in accumulation state in *Pinus tabulaeformis* plantation. Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , K^+ and Na^+ were in a state of loss, while Ca^{2+} and Mn^{2+} were in accumulation state in larch plantation; (3) Formulas of the cations transfer and net surplus were $\rho_{穿} = m_{穿} \times v_{穿}$, $\rho_{净} = c\rho_{穿} + (1-c)\rho_{降} + \rho_{树} + (\rho_{枯} - \rho_{降}) - \rho_{坡}$, and they could quantitatively analyze the cations transfer under heavy rainfall and redistribution processes.

Key words: heavy rainfall; cation; net surplus; *Betula platyphylla* plantation; *Larix gmelinii* plantation; *Pinus tabulaeformis* plantation

* 收稿日期: 2018-06-21

基金项目: 林业科技创新平台运行补助项目 (2017-LYPT-DW-004), 冀北生态公益林良种选引及优化经营技术研究。

第一作者简介: 李联地 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事森林生态调查研究。E-mail: 2196519317@qq.com

通讯作者简介: 毕君 (1963-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事森林生态研究。E-mail: bijun2003@sohu.com

森林生态系统在不断地获得养分，同时也在不断地输出养分，养分在系统内部和系统之间不断进行着交换。每年都有一定的养分随降雨、降雪和灰尘进入生态系统中；生态系统遭受火灾、病虫害或采伐等干扰产生养分流失，也通过地表径流、下渗等方式流失系统内的营养物质；一般可持续发展的森林生态系统中营养物质的输出量小于输入量，生态系统积聚养分^[1-4]，其积聚的养分包含多种化学元素及阳离子。降雨是森林循环水的主要来源，雨水通过森林植被系统，其化学元素浓度发生了很大的变化，这种变化构成了系统养分循环的重要部分，是森林生态系统化学物质的主要来源之一，也是森林生态系统养分循环及养分平衡的基础^[5-6]。目前针对植被与降雨水化学特性的研究较多，涉及不同地区的不同植被类型，其中大部分研究降雨为酸性或弱酸性降雨条件，并且穿透雨、树干径流研究较多，对灌草层及枯落物层的研究较缺乏^[7-8]。本研究在增加枯落物渗透水及坡面径流数据的基础上，编制净余量的计算公式，用于定量分析林分阳离子在弱碱性强降雨（文中“强降雨”指产生坡面径流，满足再分配各过程的取样需求，尤其是枯落物渗透水收集总量要达到3L以上的降雨）条件下的流转特征，以期更有效地计算和评价水循环对不同林分土壤中阳离子的影响，为更加合理地指导森林植被经营和可持续发展提供依据。

1 公式的提出

正常林地的阳离子主要是在降雨条件下通过地表径流及下渗流失。降雨进入森林首先分配为林窗降雨、穿透雨及林冠截留；第二步是森林的干流量；第三步是枯落物截持及下渗；第四步是地表径流，其中向土壤输送阳离子的过程包括林内降雨、穿透雨、树干径流及枯落物渗透水，坡面径流是林分阳离子的主要输出过程^[9-14]。根据上述过程，利用河北小五台山森林生态系统定位研究站降雨、穿透雨、树干径流、枯落物渗透水、坡面径流5个过程的数据，编制公式计算林分阳离子的流转。

流流量公式 $\rho_{\text{穿}} = m_{\text{穿}} \times v_{\text{穿}}$ ①。式中， $\rho_{\text{穿}}$ 为穿透雨阳离子流流量 (mg/m^2)； $m_{\text{穿}}$ 为穿透雨阳离子浓度 (mg/L)； $v_{\text{穿}}$ 为穿透雨量 (L/m^2)。

降雨、树干径流、枯落物渗透水、坡面径流流流量 $\rho_{\text{降}}$ 、 $\rho_{\text{树}}$ 、 $\rho_{\text{枯}}$ 、 $\rho_{\text{坡}}$ ，参照①计算。

净余量公式 $\rho_{\text{净}} = c\rho_{\text{穿}} + (1-c)\rho_{\text{降}} + \rho_{\text{树}} + (\rho_{\text{枯}} - \rho_{\text{降}}) - \rho_{\text{坡}}$ 。式中，净余量 $\rho_{\text{净}}$ 为输入土壤层流流量的和减去输出土壤层流流量的差值 (mg/m^2)； c 为林地郁闭度 (%)；林内降雨及穿透雨受郁闭度影响，穿透雨林地分配量为 $c\rho_{\text{穿}}$ ，林内降雨分配量为 $(1-c)\rho_{\text{降}}$ ；枯落物渗透水流流量需要减去降雨的输入为 $(\rho_{\text{枯}} - \rho_{\text{降}})$ ，枯落物渗透水收集在林窗位置进行，可以忽略穿透雨的影响^[14-15]。

其它计算 树干径流量 $v_{\text{树}}$ 用标准木平均值 ($\text{L}/\text{株}$) 乘以密度 ($\text{株}/\text{hm}^2$) 再除以 10 000，换算成单位 L/m^2 ；降雨量 $v_{\text{降}}$ 用自动气象站数据换算；其它水量用收集量除以收集面积计算得出，研究中未出现壤中流及不透水层水流。

2 公式应用

2.1 研究区及林地概况

小五台山位于河北省西北部，气候为东部季风区高寒半湿润性多雨气候，大陆性气候显著，表现为四季分明，水热同季；年平均气温 $3-7^{\circ}\text{C}$ ，最高7月，最低1月；活动积温为 $1\ 800-2\ 800^{\circ}\text{C}$ ；年均降水量 $450-620\text{mm}$ ，降水多集中在7-9月，约占全年降水量的55%左右。山涧口流域位于小五台山自然保护区，地处蔚县、涿鹿交界处；海拔 $1\ 160-2\ 882\text{m}$ ；流域内有亚高山、中山、低山、丘陵、河滩及阶地等多种地貌类型，分布有亚高山草甸、针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林、灌木林等天然次生林及油松 (*Pinus tabulaeformis*)、落叶松 (*Larix gmelinii*)、仁用杏 (*Amygdalus communis*) 等人工林。小五台山有河北省的最高峰，植被梯度变化明显，物种多样性高，有许多特有的物种，属于太行山保护较好的区域，也是北京西部重要的生态功能区，因此研究小五台山区域不同林分阳离子的流转不仅可以丰富森林水化学研究领域的个案数量和内容，还可以正确评价评估小五台山不同森林的肥力保育和发展前景，对小五台山本地森林的可持续发展及提高植被群落的生态服务功能有重要的指导意义。

研究的对象落叶松林、白桦 (*Betula platyphylloides*) 林和油松林是小五台山典型的植物群落类型，对于维持当地生态环境的稳定发挥着重要的作用。样地基本情况见表1。

表1 林地基本情况

Tab. 1 The basic conditions of forest lands

林分	海拔 /m	坡向	坡位	坡度 /°	林龄 /a	树高 /m	胸径 /cm	密度 /株·hm ⁻²	郁闭度 /%	枯落物 /cm	腐殖质 /cm
白桦	1 674	东	中	36	46	12.6	19.0	1 050	70	3.0	2.0
落叶松	1 697	东南	中	17	46	16.0	20.6	1 200	82	3.0	1.5
油松	1 380	西	中	20	48	12.8	17.8	1 550	77	3.8	2.0

注: 白桦 (*Betula platyphylla*), 落叶松 (*Larix gmelinii*), 油松 (*Pinus tabulaeformis*)。

2.2 水样的收集及测定

降雨水样在空旷地使用3个塑料槽(110cm×60cm×30cm)收集,与林地距离大于15m;穿透雨水样采用林内布设3个雨水收集槽(同上)的方法收集,放置时水槽上覆盖1层纱布防止枯枝落叶进入;根据样地每木检尺结果,选择有代表性的油松、落叶松和白桦各3株,使用塑料软管分别螺旋状缠绕于树干的方法收集树干径流水样^[16],落叶松、油松开裂树皮要削刮平整,收集桶容积100L;枯落物渗透水用3个纱布包裹的塑料盆(宽90cm,高20cm)收集,取原状枯落物平铺于纱布上,为增加收集量及减少干扰塑料盆摆放在林窗位置;坡面径流水样利用坡面径流场收集,径流场处于样地

下部,投影面积100m²(长×宽20m×5m)。水样内的K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺用原子吸收分光光度法测定;Zn²⁺、Mn²⁺、Fe²⁺用电感耦合等离子发射光谱法测定。测定重复3次,取平均值代表每次浓度,重复间差异过大时,增加重复次数,剔除明显不合理数据后取平均值^[1,17-19]。

2017年7-8月,取得7月13日、7月26日、8月12日3次弱碱性降雨水样,收集的水样在10-15日内完成处理分析。表2数据为3次水样的加权平均值。

2.3 降雨再分配过程中水量分配格局

林分的降雨水再分配量经过整理计算,结果见表3。

表2 降雨及再分配过程中的阳离子特征

Tab. 2 Characteristics of cations under rainfall and redistribution processes

指标	m _降	油松				白桦				落叶松			
		m _穿	m _树	m _枯	m _坡	m _穿	m _树	m _枯	m _坡	m _穿	m _树	m _枯	m _坡
Ca ²⁺	0.187	5.120	1.580	8.430	4.720	1.370	0.301	6.640	5.840	0.491	2.220	6.360	2.170
Mg ²⁺	1.700	0.434	0.391	1.980	0.335	0.220	0.130	1.560	0.518	0.192	0.822	1.360	0.351
K ⁺	18.600	5.750	3.790	26.000	1.610	11.600	54.600	6.200	7.000	15.700	10.000	5.450	8.250
Na ⁺	1.360	0.338	1.580	0.793	0.359	0.989	0.325	0.618	1.960	1.210	1.000	0.860	1.620
Zn ²⁺	0.065	0.074	0.062	0.130	0.068	0.100	0.060	0.098	0.039	0.064	0.116	0.080	0.061
Mn ²⁺	0.013	0.032	0.05	0.061	0.044	0.048	0.050	0.080	0.233	0.032	0.150	0.225	0.117
Fe ²⁺	0.481	0.798	0.866	1.050	1.270	0.565	0.875	1.760	8.660	0.214	0.469	5.210	4.020

注: m_降为降雨阳离子浓度、m_树为树干径流阳离子浓度、m_枯为枯落物渗透水阳离子浓度、m_坡为坡面径流阳离子浓度。

表3 再分配过程中的水量分配

Tab. 3 Water distribution patterns in redistribution processes

指标	v _降		v _穿		v _树		v _枯		v _坡					
	白+落	油松	白桦	落叶松	油松	白桦	落叶松	油松	白桦	落叶松	油松			
7月13日	59.69	49.05	48.26	51.65	45.83	8.87	0.56	0.687	4.50	4.40	5.28	3.78	3.13	4.32
7月26日	35.05	30.50	27.25	28.80	25.15	5.10	0.33	0.422	2.27	2.15	3.15	2.03	1.69	2.63
8月12日	35.05	22.70	28.42	30.75	16.33	5.40	0.34	0.314	1.62	1.56	2.42	1.64	1.40	1.97
合计	129.79	102.25	103.93	111.20	87.31	19.37	1.23	1.423	8.39	8.11	10.85	7.45	6.22	8.92

注:“白+落”是白桦、落叶松适用数据,下同;v_枯为枯落物渗透水量、v_坡为坡面径流量。

2.4 再分配过程中阳离子流转量

结合表 2、表 3 利用公式①、②计算降雨再分配过程阳离子流转量及净余量，结果见表 4。

(1) 降雨输入阳离子排序为 $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$ ，其中输入量最多的 K^+ 在白桦及落叶松林输入量为 2 414.1 mg/m²，油松林输入量为 1 901.85 mg/m²。

(2) 白桦林中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Na^+ 处于流失状态， Mg^{2+} 流失最多，流失量为 126.69 mg/m²； K^+ 、

Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态，其中 Ca^{2+} 积累最多，为 100.7 mg/m²。

(3) 油松林 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 处于流失状态，其中 K^+ 流失 804.73 mg/m²； Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态，其中 Ca^{2+} 积累最多，为 381.1 mg/m²。

(4) 落叶松林 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 处于流失状态，其中 Mg^{2+} 流失 153.6 mg/m²； Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 处于保留积累状态，其中 Ca^{2+} 保留 65.7 mg/m²。

表 4 再分配过程中的阳离子流转量与净余量

Tab. 4 Cations transfer and net surplus in redistribution processes

指标		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Zn ²⁺	Mn ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Na ⁺
$\rho_{降}$	白+落	24.27	220.64	8.44	1.69	62.43	2 414.10	176.51
	油松	19.12	173.83	6.65	1.33	49.18	1 901.85	139.06
$\rho_{穿}$	白桦	142.38	22.86	10.39	4.26	58.72	1 205.56	102.78
	落叶松	54.60	21.35	7.12	3.56	23.80	1 745.84	134.55
	油松	447.03	37.89	6.46	2.79	69.67	502.03	29.51
$\rho_{树}$	白桦	5.83	2.52	1.16	0.97	16.95	1 057.60	6.30
	落叶松	2.73	1.01	0.14	0.18	0.58	12.30	1.23
	油松	2.25	0.56	0.09	0.07	1.23	5.39	2.25
$\rho_{枯}$	白桦	55.71	13.09	0.82	0.67	14.77	52.02	5.19
	落叶松	51.58	11.03	0.65	1.82	42.25	44.20	6.97
	油松	91.47	21.48	1.41	0.66	11.39	282.10	8.60
$\rho_{坡}$	白桦	43.51	3.86	0.29	1.74	64.52	52.15	14.60
	落叶松	13.50	2.18	0.38	0.73	25.00	51.32	10.08
	油松	42.10	2.99	0.61	0.39	11.33	14.36	3.20
$\rho_{净}$	白桦	100.70	-126.69	3.06	2.31	-35.40	212.10	-54.72
	落叶松	65.68	-153.56	-0.67	2.81	-13.85	-542.79	-36.29
	油松	381.10	-85.62	0.75	1.47	17.07	-804.73	-76.70

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 利用公式①、②计算的结果，白桦和油松积累阳离子种类比落叶松林多，对于林地有更好的养分保持效果^[2-4]。落叶松林分阳离子流失种类多，符合酸性环境有利于金属离子流失的规律^[20]，落叶松弱酸性物质分泌量大（针叶林酸分泌量大于阔叶林，落叶松酸分泌量高于油松^[21-23]），提高了金属离子活性有利于金属离子的淋溶流失，也符合罗韦慧等^[12]对不同森林下溪流水质的研究结论。

森林中的干、湿沉降是林分阳离子的一种重要

来源，其变化规律和影响随着沉降成分、林分种类、林龄及降雨等环境条件而改变，有着复杂的变化过程，很难准确测定^[24-26]，但是其影响可以在数据中体现，如： Na^+ 的流失规律可以体现出湿沉降的影响^[27]。

综上所述，公式①、②计算出的结果正确反映了林分阳离子的流失规律，是可信的分析强降雨条件下林分阳离子流转的方法。

(2) 表 4 结果中 Mg^{2+} 变化与他人研究存在明显差异，分析是山地小气候引起。

结合国内外资料分析，在张伟等^[28]和盛后财等^[16]研究中降雨呈弱酸性， Ca^{2+} 浓度远远高于 Mg^{2+} 浓度，如盛后财^[16]降雨月平均浓度（mg/L）

Ca (10.807) > Mg (0.268) > Fe (0.213) > Mn (0.069); Parker 经对世界各地降雨化学资料进行总结, 其元素浓度平均值的大小排列顺序为 $S > Na > Cl > N > Ca > K > P$ ^[29]; 对于阳离子来说, Edmonds 等测定的结果是 Ca^{2+} 和 Na^+ 在天然降水中含量最多, 几乎接近海水中上述 2 种阳离子的含量^[30]。本研究离子排序 $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$, 与许多水化学特征研究文章^[7,10,12-13,15-16,18,28] 中阳离子组成规律有明显差别, Na^+ 远低于 Edmonds 等测定的结果, 说明降雨中金属离子主要来源于内陆^[10]; Mg^{2+} (1.7mg/L) 浓度高于 Ca^{2+} (0.187mg/L) 浓度, 也远高于盛后财等^[16]测定的 Mg^{2+} 浓度, 其中张伟等^[28]的研究地点与本研究地点同在河北省北部地区, 但是差异明显, 分析表明山地小气候造成对流雨、地形雨较多, 受内陆土壤、灰尘等携带阳离子影响引起降雨成分的不同^[31-32], 可见小五台山地区降雨有自身的地域特点, 小气候特征明显。

对于 Na^+ 的流失, 有利于降低土壤碱化度 (碱化度与交换性 Na^+ 有极显著相关性) 和土壤肥力的积累。 Na^+ 不是植物的必需元素, 对植物的功能还未确定 (有毒害的作用已经确定), 所以植物中 Na^+ 很少, 根系对 Na^+ 的吸收可能是被动的, 但排泄是主动的^[33-34]。3 种林分中 Na^+ 的流失、 Ca^{2+} 的积累有利于保持良好的土壤特性。如罗小东等^[35]研究 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 施量为土壤 Na^+ 含量的 200% 时, 土壤的容重下降 14.44%, 较其他处理下降幅度大; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 施量为土壤 Na^+ 含量的 200% 和 300% 时, 土壤的含水量较其他处理增加幅度大, 分别为 5.94% 和 6.21%; $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 施量为土壤 Na^+ 含量的 200% 和 300% 时, 更有利于土壤的脱盐。

3.2 结论

(1) 降雨输入阳离子排序为 $K^+ > Mg^{2+} > Na^+ > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Zn^{2+} > Mn^{2+}$ 。

(2) 白桦林中 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Na^+ 处于流失状态; K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态。油松林 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 表现为淋溶流失; Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 处于保留积累状态。落叶松林 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 表现为淋溶流失; Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 处于保存积累状态。

(3) 流转量公式 $\rho_{穿} = m_{穿} \times v_{穿}$ 和净余量公式 $\rho_{净} = c\rho_{穿} + (1-c)\rho_{降} + \rho_{树} + (\rho_{枯} - \rho_{降}) - \rho_{坡}$ 可以定量的分析强降雨再分配过程中土壤阳离子的流转。

参考文献:

- [1] 王兵, 鲁绍伟, 李红娟, 等. 森林生态系统长期定位观测方法 LY/T 1952-2011 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 肖风劲, 欧阳华, 傅伯杰, 等. 森林生态系统健康评价指标及其在中国的应用 [J]. 地理学报, 2003, 58(6): 803-809.
- [3] 袁兴中, 叶林奇. 生态系统健康评价的群落学指标 [J]. 环境导报, 2001, 2(1): 45.
- [4] 蔺焕忠, 任生, 于洋. 我国保护区森林生态评价研究现状 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(12): 7140-7141.
- [5] 王会利, 曹继钊, 江日健, 等. 广西不同林分林区地表水水质的综合评价 [J]. 西部林业科学, 2017, 46(4): 18-23.
- [6] 余新晓, 张志强, 陈丽华. 森林生态水文 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [7] 鲍文, 包维楷, 丁德蓉, 等. 森林植被对降水水化学的影响 [J]. 生态环境, 2004, 13(1): 112-115.
- [8] 邱治军, 牛强, 周光益, 等. 广州市溪流河小流域典型林分枯落物的持水特性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(4): 64-67.
- [9] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 420-426.
- [10] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 等. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1223-1228.
- [11] 徐义刚, 周光益, 骆土寿, 等. 广州市森林土壤水化学和元素收支平衡研究 [J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1670-1681.
- [12] 罗韦慧, 满秀玲, 田野宏, 等. 大兴安岭寒温带地区森林流域溪流水化学特征 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 119-124.
- [13] 李道宁, 王兵, 蔡体久. 江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2193-2200.
- [14] 欧润贵, 欧松, 江继勇, 等. 森林水文作用动态过程模型及效应评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 1995, 15(2): 105-115.
- [15] 卢晓强, 杨万霞, 丁访军, 等. 茂兰喀斯特地区森林降水分配的水化学特征 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2115-2122.
- [16] 盛后财, 蔡体久, 朱道光, 等. 原始红松林穿透雨和树干茎流养分特征研究 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 48-51.