

太湖北部典型乔木冠层对酸性降雨的中和作用*

宋玉芝^{1,2,3}, 秦伯强¹, 杨龙元¹, 胡维平¹, 罗激葱^{1,2}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

(2:中国科学院研究生院,北京 100039)

(3:南京信息工程大学环境科学与工程系,南京 210044)

摘要:2003年6-7月梅雨期间,于太湖北部测定大气降雨、典型林冠穿透雨和地表径流水等样品的pH和N、P等营养元素化合物离子浓度,结果表明,林冠层穿透水pH平均值比大气自然降水高约1.2个pH单位,其中和酸性物质效率为82%-97%,中和能力显示出阔叶树大于阔、针叶混交树,阔、针叶混交树大于针叶树的规律,并计算比较了乔木冠层和草坪、村镇地表径流水相对于自然降水中的TN、TP比值。从而得出,树木冠层穿透水中的离子浓度的变化是对酸沉降的一种积极的响应。

关键词:酸沉降;林冠穿透水;太湖

Role of Typical Arbor Layer in Neutralizing Acid Rain in Northern Taihu District

SONG Yuzhi^{1,2,3}, QIN Boqiang¹, YANG Longyuan¹, HU Weiping¹ & LUO Liancong¹

(1: Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, P. R. China.)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

(3: Dept. of Environment & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

Abstract: During the plum rain period of June-July in 2003, the pH values and concentrations of N, P elements of samples of rainfall, throughfall and runoff in north Taihu Lake were measured. The results showed that the average pH value of throughfall was 1.2 pH unit higher than that of rainfall. The efficiency of neutralization acidic matter was 82% - 97%, The order of abilities of neutralization for acidic rain of different canopy were as following: broadleaf > mix of broadleaf and conifer > conifer. At the same time, the ratios of TN, TP of waters from arbor, lawn, village and small town to those of rainfall were also calculated. Variations of iron concentrations of rainfall through arbor layer were an active response to acid deposition, i. e. decreasing the degree of acid rain.

Key words: Acid deposition; throughfall; Lake Taihu

太湖流域是我国酸雨的高发生区之一^[1]。近20年来,随着工农业生产的发展和人口的增长,太湖周边城镇大气污染加剧,由此引起酸雨频率及强度日益增加。太湖水体对长期酸性降水的作用已有一定程度的外在表现和指标响应,如湖硬度(钙、镁离子)对总碱度(CO₃²⁻、HCO₃⁻)的比值不断上升^[2]。为探讨太湖流域大气污染的潜在影响,降低和减缓酸雨对湖泊水体生态系统的危害,2003年6-7月份梅雨期间,作者于中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(以下简称“太湖站”)收集大气降雨、典型林冠穿透雨和地表径流水等样品,测定雨水样品的pH、TN、TP及其阴、阳离子化学组成,结合相关研究资料,指出太湖流域雪松、香樟、石楠等典型乔木植被对于水中的酸性物质具有明显的中和作用;初步分析了发生于水-叶片界面物质交换过程的机理;提出在长期酸沉降作用下延缓湖泊酸化,保护水生态系统功能的有效措施。为太湖水体生态系统的保护和治理,改善水质,保证工农业高度发达的太湖流域内国民经济的持续稳定发展提供决策依据。

* 国家自然科学基金委员会与香港资助局合作课题“大气氮磷输入对湖泊水质的影响研究”(N-HKUST612/01, 40131160734)共同资助。2004-04-29收稿;2004-07-19收修改稿。宋玉芝,女,1970年生,在读博士,讲师。
E-mail: syz@niglas.ac.cn

1 实验及方法

1.1 树种及时间

太湖站常见的乔木树种有雪松 (*Cedrus deodara*), 香樟 (*Cinnamomum camphora*), 石楠 (*Photinia serrulata*), 扁柏 (*Biota orientalis*), 女贞 (*Ligustrum lucidum*), 杨梅 (*Myrica rubra*), 苦楝 (*Pistacia chinensis*) 和棕榈 (*Trachycarpus*).

研究时因地制宜, 进行单独树种树冠如雪松、香樟和混交树种树冠如石楠 + 苦楝、扁柏 + 女贞、杨梅 + 棕榈等组合对降雨化学组成的观测.

为了研究典型树种树冠叶片在连续雨水强烈冲刷条件下的水-叶片生物界面的物质交换反应过程, 选择梅雨季节进行观测研究. 2003 年太湖流域梅雨季节从 6 月中旬开始, 至 7 月中旬结束, 历时约 1 个月. 依据太湖站观测资料, 2003 年 6-7 月雨量为 310.6 mm, 占当年降雨总量 906.9 mm 的 34.2%. 为最大限度降低树冠叶片积尘物质对雨水和叶片界面交换过程的干扰, 前 3 次降雨未作观测. 本研究自 6 月 26 日始至 7 月 11 日止连续进行 6 次采样观测, 雨量累计为 218.8 mm (表 1), 占年降雨量的 24.1%, 占 6、7 两个月总雨量的 70.4%, 其中日降雨量大于 40mm 的大雨有 4 次, 日降雨量大于 10mm 而小于 40mm 的中雨有 2 次, 小于 10mm 的小雨有 1 次, 因此本研究具有一定的代表性.

表 1 观测日降雨量
Tab. 1 Observed daily rainfall

观测日期	6 月 27 日	6 月 29 日	7 月 5 日	7 月 6 日	7 月 7 日	7 月 11 日
降雨量 (mm)	36.40	60.40	44.10	18.40	3.20	56.30

1.2 采样和分析

未受树冠叶片表面作用的自然大气降雨采样对照点设置于太湖站气象观测场内. 降雨开始 10 min 后分别置 2 个洁净的 1000 ml 大玻璃烧杯于离地面约 1.5 m 处的铁架中收集雨水, 同时于选定的观测树种树冠下距地面 0.5 m 处设置相同的雨水采集杯收集穿透树冠雨水 (简称“穿透雨”) 样品. 地表径流水在较大降雨 4-6 h 后采样, 2 个不同类型的地表径流水采样点分别选在太湖站水泵房傍和附近的康山村排水沟出口处. 太湖站水泵房傍地表径流水汇水区植被主要为草地和山坡林地, 代表自然植被作用下的入湖径流水. 康山村地表径流水汇水区则主要汇集建筑物屋面和民居建筑前后生活污水, 代表受人类活动影响作用下的入湖径流水. 选择表面涂敷油漆的铝质彩钢板屋面、黑色泥瓦屋面和水泥顶屋面作为非生物界面作用对照点. 受降雨量条件限制, 地表径流水和非生物界面作用对照点仅做少量观测. 样品采集后分成 2 份, 一份立即按湖泊富营养化调查规范在太湖站实验室用 PHS-3C 型数字酸度计和 DDS-11C 型电导率仪测定 pH、电导率; 过硫酸钾消解, 岛津 UV-2400 紫外分光光度计测定吸光度法测定总氮、总磷. 另一份样品冷冻保存, 用 GF/C 型 Whatman25# 滤纸过滤后用美国 Dionex 公司生产的 DX-120 型离子色谱仪测定阴、阳离子组成.

2 结果和讨论

2.1 pH

大气降雨穿过树木冠层到达土壤, 然后进入湖泊是流域水循环过程的一个重要阶段, 能够直接或间接地影响着流域内湖泊水体的水质. 2003 年梅雨期间太湖站气象站采集的大气降雨 6 次共计 10 个样本, 雨水 pH 的变化范围为 4.60-6.68, 平均值为 5.00 (表 2). 按酸雨的评判标准值 5.6 衡量, 其中有 5 次降雨属于明显的酸雨, 酸雨频率为 83.3%, 表明太湖流域在此期间未经树冠作用直接落入湖泊的雨水可将大量酸性物质带入水体, 而经树冠叶片作用后的穿透雨的 pH 均有明显的上升. 以雪松为代表的针叶树的穿透雨的 pH 变化范围为 5.20-6.00, 平均值为 5.76, 高于评判酸雨的标准值 5.6 约 0.2 个 pH 单位; 以香樟为代表的阔叶树穿透雨的平均 pH 比针叶树高, 达 6.30; 而 3 种混交树冠穿透雨 pH 的范围波动在 6.04-6.97

之间,平均值为 6.27,高于酸雨标准值约 0.70 个 pH 单位.从 pH 的平均值看,雨水穿过针叶树冠层及阔叶、混交林树冠后,其值升高了约 1.2 个 pH 单位,最高可达 1.9 个 pH 单位.经过水-叶片界面交换作用,雨水中的酸性物质在进入地表以前已被大量中和,说明这几种典型树木植被在防止、延缓地表水体的酸化方面具有重要的现实意义.按 pH 的定义,计算了各种类型树冠穿透水中 H^+ 的浓度及经水-叶片交换作用中和雨水中酸性物质的百分数.结果表明,乔木树种不同,对酸性雨水的中和能力也各不相同.在 5 种类型树冠组合中,雪松树冠中和酸性物质的能力最低,中和百分数为 82.62%,而枝繁叶茂的香樟树冠中和酸性物质的能力最强,中和百分数可达 96.98%,有阔叶树冠大于阔、针叶混交树冠,阔、针叶混交树冠大于针叶树冠的规律存在.假设年降雨均为 pH 等于 5.00 的“酸雨”,太湖流域年平均降雨量按 1040mm 计,则各类乔木树冠单位面积年中中和酸性物质率约为 8-10 $kg/(km^2 \cdot a)$.在一定条件下,树木冠层能改变穿透水的 pH,降低雨水中的酸性物质及基团向地表水的输送负荷.在酸沉降严重地区,植树造林对保护湖泊水体生态系统,延缓水体酸化危害具有重要意义.

表 2 树冠穿透水 pH 及中和酸性物质百分数

Tab. 2 pH of throughfall and percentage of neutralization acid matter

	对照点	雪松	扁柏+女贞	香樟	石楠+苦楝	杨梅+棕榈
<i>n</i>	6	5	4	6	6	5
pH	5.00	5.76	6.27	6.30	6.23	6.32
<i>SE</i>	0.32	0.15	0.17	0.28	0.31	0.17
中和酸百分数(%)		82.62	94.63	97.43	96.98	95.21
中和酸性物质率($kg/(km^2 \cdot a)$)	8.59	9.84	10.13	10.09	9.90	

2.2 离子组成

树冠穿透水的 pH 变化,是由大气降水-植物叶片界面相互作用造成的.一方面植物叶片表面选择性地吸收酸雨的某些成分,另一方面酸雨穿透植被冠层时对植物叶片有淋洗作用^[3].林冠穿透水中阴阳离子浓度是由离子交换和物理冲刷这两方面因素共同作用的结果,林冠穿透水阴阳离子组成可在一定程度上解释树冠穿透水的 pH 的变化.为探讨水-叶片界面交换机理,用离子色谱法测定了部分穿透水化学组成.其中 2003 年 6 月 29 日,7 月 5 日和 7 月 11 日 3 次降雨共 5 个对照点雨水样品的阴、阳离子平均浓度见表 3.由表 3 可见,太湖北部地区未经树冠叶片生物表面作用的自然降水中,阳离子以 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 浓度较高,分别达 43.6 和 37.6 $\mu mol/L$,而测定的阴离子浓度最高的是 Cl^- ,达 71.9 $\mu mol/L$,其次是 NO_3^- ,平均浓度为 61.3 $\mu mol/L$;形成酸雨的主要阴离子 SO_4^{2-} 的浓度并不很高,仅为 16.4 $\mu mol/L$.夏季主要是东南季风,大气成分受北方燃煤排放出的二氧化硫影响小,太湖流域是我国国民经济高度发达地区,以汽车为代表的现代化交通工具日益增多,大气的 NO_x 污染加剧,致使雨水中以 NH_4^+ 和 NO_3^- 组分为主要污染物.这是太湖北部夏季梅雨期酸性降雨不同于我国其他酸雨地区的特点.

表 3 对照点雨水离子组成

Tab. 3 Ionic composition of rainwater in controlled site

离子组成	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
C ($\mu mol/L$)	29.8	43.6	8.0	2.1	37.6	23.6	71.9	61.3	16.4
<i>SE</i>	4.5	5.9	0.7	0.3	3.2	10.3	31.8	26.1	6.1

依据当量定律,可计算出表 3 中各阳离子总电荷数为 160.8 μeq ,各阴离子总电荷数为 189.7 μeq ,阴阳离子电荷数不平衡,阳离子总电荷数比阴离子总电荷数少 28.9 μeq ,使得雨水呈现酸性.

不同的离子在水-叶片界面上表现出的交换性能各不相同.树冠穿透水中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等阴阳离子浓度平均值与对照点雨水中各个相应组分相比增减倍数见图 1,图

2, 从图中可看出, 各个离子所表现出的交换性能特征大体上可分为:

2.2.1 浓度下降型 离子浓度经水-叶片界面交换后下降, 离子被吸附于树冠叶片表面, 甚至被吸收进入叶片组织, 转而输送至树木的根、茎、干、叶各个有机体中. 属于这一类的离子有 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^- 等离子.

2.2.2 浓度不变型 离子浓度经水-叶片界面交换后基本上无显著变化, 与大气自然降水过程类似. 表现上表现为离子浓度不受水-叶片生物表面相互作用的影响, 离子浓度维持在恒定数量级值上. 属于这一类的离子有 Na^+ 和 NH_4^+ 等离子.

2.2.3 浓度升高型 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子经水-叶片界面交换后浓度显著升高, 如穿透水中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子浓度分别比对照点雨水中相应离子浓度增高 7-17, 6-10, 3-8, 2-12 倍. 表明酸性雨水与叶片界面接触过程中, 有大量 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子从叶片表面组织进入树冠穿透水中. 正是由于这些阳离子与酸雨中 H^+ 交换, 达到降低酸雨的酸度, 缓冲了雨水中酸性物质对水体、土壤的危害.

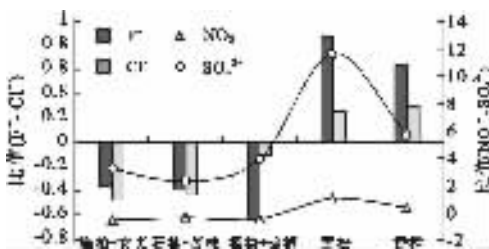


图1 乔木冠层穿透水中各个阴离子的浓度与对照点雨水中相应组分的增加倍数

Fig. 1 Concentrations of anion of arbor layer throughfall increase multiple comparing to control

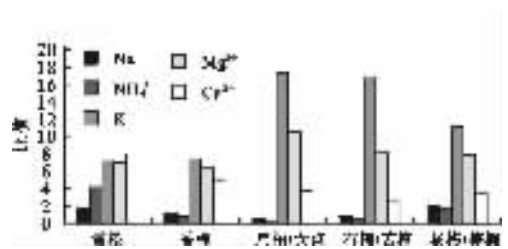


图2 乔木冠层穿透水中各个阳离子的浓度与对照点雨水中相应组分相比增加的倍数

Fig. 2 Concentrations of cation of arbor layer throughfall increase multiple comparing to control

根据上述分析, 作者认为, 太湖北部典型乔木树冠层中和降雨中的酸性物质的机制为叶片表层选择性吸收雨水中的 NO_3^- 、 F^- 和 Cl^- 等酸性阴离子, 让碱性的 Na^+ 和 NH_4^+ 顺利通过; 同时进行离子交换, 吸留雨水中的 H^+ , 释放出大量 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等进入穿透水中, 使穿透水的 pH 显著升高.

值得一提的是, 不同的树种及组合影响大气降水化学组成的能力也存在着明显差别^[4]. 针叶树种雪松的树冠穿透水对所有的阴阳离子均有显著的富集效应, NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子均明显的增高, 尤其是 SO_4^{2-} , 可增高 7-11 倍. 这一现象与雪松的针状叶片在与雨水的接触过程中能够分泌松脂等有机物质有关. 杉木、杨梅等常绿阔叶树则对 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 等阴离子有明显的截留效应; 但对 K^+ 离子却有相反的富集效应, 使树木冠层有机体中大量 K^+ 流失. 当然, 不同的树种其分泌物不同, 即使是同种树, 由于其生育期不同, 使得其中和能力不同. 如针叶树种, 自身能分泌有机酸性物质, 这些物质被大气降水洗脱, 可降低穿透水的 pH, 表现在对 H^+ 中和能力的下降. 同时也使仅用穿透水中的无机离子来解释不同类型冠层对酸中和能力有一定困难.

2.3 TN, TP

TN 和 TP 是判断湖泊水体富营养化的重要指标^[5]. 梅雨期间在太湖站对照点降雨中的 TN 浓度变化范围 0.423-1.923 mg/L, 平均值为 1.123 mg/L. TP 浓度变化范围为 0.0198-0.0412 mg/L, 平均值为 0.0279 mg/L. 大气降雨经过各种树冠层后, 树冠穿透雨的 TN 和 TP 浓度均有较大增加. 以每次降雨事件对照点雨水样品的 TN、TP 浓度为基准值, 分别计算了各类树冠穿透水的 TN、TP 与基准值的比值(图3). 由图3 可看出, 针叶树及针阔混交树冠层穿透雨中的 TN 和 TP 浓度增量较大, 6次观测穿透雨的 TN 和 TP 浓度分别为对照点雨水中 TN 和 TP 浓度的 3.4-6.2 倍和 12.3-27.4 倍. 这与雨水穿透针叶冠层时对叶片有淋洗作用, 使叶片表面富含 N、P 的分泌物被降水洗脱有关. 阔叶树及阔叶混交树冠层穿透雨的 TN、TP 浓度增量相对较小, 其富集因子分别为 2.6-3.1 和 3.9-7.2.

有趣的是,大气降雨经非生物界面作用后,水样中的 TN 与 TP 浓度增高不大。彩钢瓦屋面、黑瓦屋面和水泥顶屋面的富集因子分别为:TN 为 1.3、1.2、0.9,平均值为 1.13;TP 为 2.1、1.0、1.9,平均值为 1.67,基本上与对照点雨水中的 TN、TP 浓度相当。表明穿透水中 TN、TP 浓度的增加,是植物叶片界面特有的性能,是与植物的生命活动和营养物质的输送相联系的。

由于乔木树冠对雨水中的 TN、TP 有较大的富集,由此是否会加速湖泊水体的富营养化? 对此问题的答案是否定的。大气降雨虽然能从乔木树冠层中淋洗、交换一定数量的氮磷物质降落至地表,但由于植物生物泵的作用,穿透水中的 N、P 组分在进入湖泊水体之前,很快被植物的根系所吸收,进入植物体,转化为有机物质;有的则重新参与雨水与叶片间的再交换过程。此外,沉降进入地表的树冠穿透水中的 N、P 还会经历与土壤物质的交换和生物化学作用,某些离子如 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 等被土壤颗粒的吸附作用而减少,这是由乔木植株与土壤、大气构成的小循环系统功能所决定的^[6]。从本研究中观测的 2 类不同性质的地表径流水的比值看,受人类活动干扰较少的草坪径流水虽然增加了水-草叶片交换的影响,但是 TN、TP 浓度增高幅度基本上与阔叶树的穿透水浓度相当, TN、TP 的比值分别为 2.8 和 3.0,未发生显著提高,表明由乔木植株与土壤、大气构成的小循环系统能够有效地调控入湖地表径流水的 N、P 浓度。而村庄径流水的 TN、TP 浓度比草坪径流水高得多, TN 的富集因子达 6.2, TP 的富集因子则高达 36.7,表明在人类活动影响较大的小区域内,入湖径流水中带入的 N、P 污染物较多,增加了湖泊的外源性 N、P 负荷,对湖泊水体的富营养化影响较大(图 3)。因此,在地表径流水可直接注入湖泊水体的湖滨带内,应严格控制宾馆、疗养院等建设。

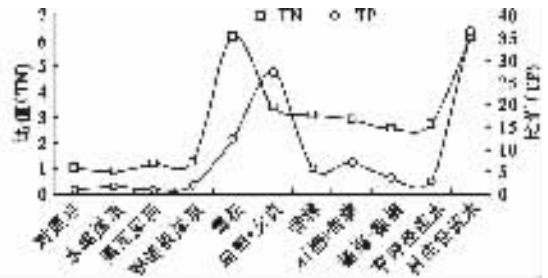


图 3 树冠穿透水及不同性质的地表径流水 TN、TP 的富集因子

Fig. 3 Ratios of TN、TP of throughfall and runoff

4 结论

(1) 2003 年梅雨季节太湖北岸 6 次连续性大气降水的 pH 平均值达 5.00, 是酸性降雨, 以雪松、香樟等为代表的典型乔木冠层具有中和大气中酸性污染物质的能力。经树冠叶片接触的穿透水 pH 平均值比大气自然降水高约 1.2 个 pH 单位, 乔木林冠层中和酸性物质效率为 82% - 97%。不同乔木对酸雨的中和能力不同, 有阔叶树大于阔、针叶混交树, 阔、针叶混交树大于针叶树的规律。乔木树冠对大气污染引起的酸沉降的缓冲作用在防止湖泊等内陆水体的酸化方面具有重要的实用意义。

(2) 分析了典型乔木冠层叶片中和大气中酸性物质的机理, 提出在雨水-叶片表面交换过程中, 叶片生物表面在吸附、截留 NO_3^- 、 F^- 和 Cl^- 等酸性阴离子的同时, 淋洗、交换出 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等碱性阳离子, 并让 Na^+ 和 NH_4^+ 无阻挡顺利通过界面, 是乔木树冠能够中和酸性降水中 H^+ 的主要原因。

(3) 计算比较了乔木冠层和草坪、村镇地表径流水的相对于自然降水中的 TN、TP 富集因子, 讨论了树木植株、土壤、大气小循环系统中树木植株表现出的生物泵的作用和对湖泊水体富营养化的影响。

5 参考文献

- [1] 孙崇基. 酸雨. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [2] 杨龙元等. 酸雨对太湖水环境潜在影响的初步研究. 湖泊科学, 2001, 13(2): 135 - 142.
- [3] 管东生等. 华南南亚热带不同演替阶段植被的环境效应. 环境科学, 2003, 21(5): 1 - 5.
- [4] 管东生. 香港的酸雨和地表水酸度. 中国环境科学, 2001, 21(4): 326 - 329.
- [5] 孙顺才, 黄漪平主编. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993: 199 - 200.
- [6] 董小卫等. 酸沉将影响下春季庐山森林生态系统水溶态氮的分布及其动态. 南京农业大学学报, 1999, 22(4): 45 - 48.