

大气湿沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算*

宋玉芝^{1,2,3}, 秦伯强¹, 杨龙元¹, 胡维平¹, 罗淑葱¹

(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:测定和分析了2002年7月至2003年6月太湖周边地区太湖站、拖山岛、东山站、无锡、苏州、湖州、常州等7个站点大气降水化学组成,计算了水气界面 TN 、 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 、 TIN 、 TON 的湿沉降率。结果表明,大气降水的 TN 浓度变化范围为 2.06 ± 0.30 (常州)– 3.71 ± 0.43 (拖山岛),太湖流域大气降水已呈富营养化水质的特征;大气降水 TN 、 NH_4^+-N 、 $NO_3^- - N$ 、 TIN 、 TON 的年均湿沉降率分别为 2806.75 kg/km^2 、 1458.81 kg/km^2 、 631.67 kg/km^2 、 2090.48 kg/km^2 和 716.28 kg/km^2 ;每年由湿沉降直接进入太湖水体的 TN 约为 6562.2 t , NH_4^+-N 为 3410.7 t , $NO_3^- - N$ 为 1476.8 t , TIN 为 4887.5 t , TON 为 1674.7 t ; TN 占入湖河道年输入污染物总量的 13.6% 。大气湿沉降中, TIN 对 TN 的贡献比较大,平均约占 TN 的 78.78% 。 TIN 的湿沉降率具有季节性分布,夏季高,春季次之,秋冬季低。这种现象无疑对太湖水体的蓝藻爆发和富营养化具有潜在的促进作用。

关键词:太湖;大气污染;湿沉降;富营养化

Primary Estimation of Atmospheric Wet Deposition of Nitrogen to Aquatic Ecosystem of Lake Taihu

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

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

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

(3: Department of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

Abstract: Fluxes of atmospheric wet deposition of nitrogen and precipitation chemical composition were measured from July 2002 to June 2003 at the lakeside of Lake Taihu, on the Taihu Station, Tuoshan Island, Dongshan Station, and Wuxi, Suzhou, Huzhou, Changzhou sites. Results show that TN concentration of atmospheric wet deposition ranged from 2.06 (Changzhou site) to 3.71 (Tuoshan Island site) and atmospheric wet deposition in the valley of Lake Taihu shows eutrophication. The wet deposition rate (F_w) of TN , NH_4^+-N , $NO_3^- - N$, TIN , TON between atmosphere–water interfaces were measured, and the annual average F_w of TN , NH_4^+-N , $NO_3^- - N$, TIN , TON was 2806.75 kg/km^2 , 1458.81 kg/km^2 , 631.67 kg/km^2 , 2090.48 kg/km^2 and 716.28 kg/km^2 , respectively. The direct input of TN , NH_4^+-N , $NO_3^- - N$, TIN , TON through atmospheric wet deposition is 6562.2 t , 3410.7 t , 1476.8 t , 4887.5 t , 1674.7 t , respectively, and accounts for 13.59% of the total of the aquatic ecosystem of Lake Taihu. TIN dominated in TN , accounting for 78.78% of TN . The variation of TIN wet deposition rate showed a seasoned seasonal feature: it was higher in summer, next in spring, and lowest in winter and autumn. This phenomenon may potentially accelerate the cyanobacterial bloom and the eutrophication process of the water body of Lake Taihu.

Keywords: Lake Taihu; atmospheric pollution; wet deposition; eutrophication

长期以来雨雪被认为是清洁大气环境的自然方法,通过大气沉降多种元素进入海洋、湖泊也是生物地

* 国家自然科学基金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)联合资助。2004–09–08 收稿;2005–03–16 收修改稿。宋玉芝,女,1970年6月,在读博士,讲师。E-mail: syz@niglas.ac.cn.

球化学物质循环研究的重要组成部分。研究表明,即使在地球上偏远地区干净的大气降水中,也含有一定浓度的 N、P 元素;而在污染地区的雨水中, N、P 含量可上升 1-2 个数量级,从而对海洋、湖泊水体的富营养化产生重大影响^[1-3]。目前,五大淡水湖泊中的太湖、巢湖富营养化十分严重,藻类水华频发,水质恶化,已成为极其严重的生态环境灾害,导致了临近的大中城市面临严重的水质性缺水。太湖是我国第三大淡水湖,面积 2338 km²,流域面积 36500 km²,地跨苏、浙、皖、沪三省一市,流域内人口稠密(910 人/km²),经济高度发达(国民总产值约占全国的 10% 以上),流域经济在全国经济中占举足轻重的地位。太湖水体的富营养化污染已经危及到湖泊周边地区国民经济的稳定、持续发展^[3]。

目前,研究大气沉降对森林及海洋生态系统的影响较为普遍,但氮磷等营养元素经大气传输途径进入湖泊水体生态系统的重要性还未引起国内有关部门和学术界的足够重视。本文于 2002 年 7 月至 2003 年 6 月对中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)、东太湖水体农业实验站(简称东山村)和太湖北部梅梁湾口拖山岛 3 个点进行了大气湿沉降率的观测,结合太湖周边无锡、苏州、湖州、常州等 4 个城市提供的大气湿沉降观测资料,不仅估算了通过大气湿沉降直接输送到湖泊氮的总量,而且还研究了通过大气湿沉降输送到水体中氮的形态组分及比例,初步揭示了太湖水体大气湿沉降率空间变化特征及其对湖泊水体富营养化污染的潜在影响,为太湖富营养化污染的治理提供了基础资料和新思路。

1 试验方法及试验设计

1.1 采样点

太湖站、拖山岛、东山村等降雨采样站点与周围工业城市的相对位置见图 1。太湖站座落于太湖北部梅梁湾与西太湖主体水域交界处,周围地区由桔树、桃林、杨梅及多种野生乔灌木植被覆盖;拖山岛位于太湖站的东南面约 7 公里的开阔水面之中,面积约 20 km²,降雨采样点设置在拖山岛居民菜园之中;东山村的采样点设于鱼塘埂上,周围水域开阔,无局地工业和交通污染源的影响。无锡、苏州、湖州、常州等市的降雨采样、分析由各市国家环境保护局组织人员按国家环保局相关标准进行。

1.2 分析测定

太湖站、拖山岛、东山村 3 个站点雨样的采集是在降雨开始约 10 min 后用洗净的 1L 大玻璃杯于高于地面 1.5m 处的铁质采样架中收集雨水样品。降雨结束后分采集的雨水样品为 3 份。用 PHS-3C 型酸度计和 DDS-11C 型电导率仪分别测定第 1 份雨水样品的 pH 和 EC;第 2 份雨水样品置于比色管中,按湖泊富营养化调查规范^[4]用过硫酸钾硝解法测定 TN、TP 浓度;剩余雨水样品立即冷冻保存,用 Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸过滤后,NO₃⁻、PO₄³⁻、NH₄⁺ 等阴、阳离子组成用美国 Dionex 公司生产的 DX-100 型离子色谱仪测定。

2 结果与分析

2.1 太湖周边地区湿沉降的 pH 及氮的浓度

表 1 是环太湖地区采样站点湿沉降的 pH、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的年均浓度,用降雨量的加权平均来表示,公式为 $C_w = \sum C_i * H_i / \sum H_i$,其中 C_i 是第 i 次降雨事件中某物质的浓度(mg/l), H_i 是第 i 次降雨事件的降雨量(mm)。

2002 年 6 月-2003 年 7 月,采样点的 pH 范围为 4.55 ± 0.11(太湖站) - 6.53 ± 0.16(无锡),平均 pH 为 5.50 ± 0.26。太湖、湖州酸雨发生的强度比较大,最低 pH 达 3.56,平均 pH 小于 5.00。其次是东山村和常州市,无锡市与苏州市相对来说比较高。比较 pH 的空间分布不难发现,无锡与太湖站相距较近,太湖站的年均 pH 较低,而无锡的 pH 相对来说较高。究其原因,太湖站的上风向有个较大的望亭电厂,对太湖站及周

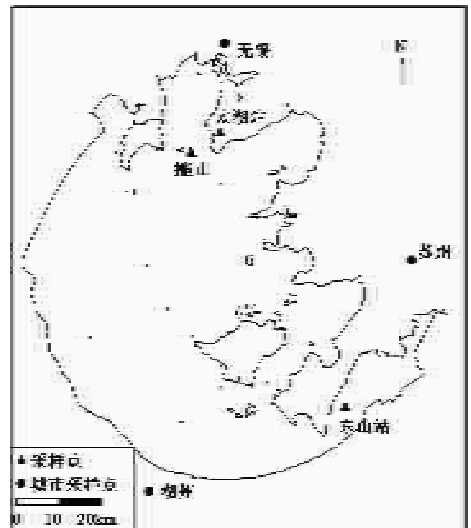


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling site

边的环境有直接的影响,无锡处于望亭电厂的下风向稍偏.当然还有其他因素,因 pH 的高低不仅与氮的氧化物含量有一定的关系,还受多种因素影响,比如硫酸根的含量,气溶胶粒子的化学性质、大气中的尘埃等.根据杨龙元^[5]1998年-2000年春季监测的太湖站的降水和杨晓红^[6]于1997-1998年监测的南太湖几个地区的大气降水状况,南北太湖降雨的平均 pH 及其最大值和最小值均有所降低,这说明太湖流域大气酸化污染有恶化的趋势,太湖流域未来的酸沉降不容乐观.

表1 太湖周边地区湿沉降的 pH 及氮的浓度
Tab. 1 pH and concentrations of N of wet deposition around Taihu

站点(样品数)	pH		NH ₄ ⁺ -N(mg/L)		NO ₃ ⁻ -N(mg/L)		TN(mg/L)	
	均值(范围)	SD	均值(范围)	SD	均值(范围)	SD	均值(范围)	SD
太湖站(n=43)	4.55(3.56-6.77)	0.73	1.44(0.55-3.48)	0.69	0.76(0.11-3.06)	0.69	2.55(0.42-9.88)	2.14
东山站(n=33)	5.22(3.61-7.18)	1.05	1.20(0.17-3.95)	0.81	0.51(0.05-3.04)	0.60	2.62(0.51-9.26)	2.20
拖山(n=38)	5.54(3.82-7.87)	0.99	1.84(0.50-3.93)	1.46	0.68(0.02-4.91)	0.8	3.71(1.25-13.81)	2.63
湖州(n=24)	4.92(3.56-7.11)	0.83	1.38(0.82-3.73)	0.70	0.49(0.18-1.64)	0.37	2.55(0.64-6.77)	1.91
常州(n=37)	5.48(3.98-7.26)	0.91	1.28(0.36-4.80)	1.17	0.21(0.15-0.43)	0.06	2.06(0.19-8.94)	1.84
无锡(n=13)	6.53(4.92-7.62)	0.59	1.40(0.02-3.18)	0.96	0.84(0.31-2.96)	0.68	2.86(0.81-7.10)	1.71
苏州(n=38)	6.25(4.06-7.95)	1.03	1.34(0.72-3.93)	0.65	0.74(0.01-2.82)	0.64	2.60(0.97-4.91)	1.00

从 TN 来看,其浓度变化范围为 2.06 ± 0.30 mg/L(常州) - 3.71 ± 0.43 mg/L(拖山岛),几个站点的均值为 2.71 ± 0.19 mg/L,年均浓度最高值在拖山站,最低值在常州站.对生物来说,溶解性氮比较重要,特别是可溶性 TIN 可被生物直接利用,能迅速提供浮游植物所需的氮,另一方面 TIN 对 TN 的浓度贡献比较大,约占湿沉降 60% 以上,其变化规律与 TN 相似,所以,本文着重分析比较 TIN.

可溶性 TIN 主要由 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 组成.比较各采样点降水中的 NH₄⁺-N 可发现,雨水中的 NH₄⁺-N 年均浓度随采样点的不同而发生变化,其年均范围为 1.20 ± 0.14 mg/L(东山站)至 1.84 ± 0.24 mg/L(拖山站),平均值为 1.41 ± 0.08 mg/L,变异系数为 15%. NH₄⁺-N 的年均浓度最高值拖山岛比最低值东山站高约 40%; NO₃⁻-N 的年均浓度变化较大,平均 NO₃⁻-N 浓度为 0.60 ± 0.08 mg/L,年均浓度范围为 0.21 ± 0.01 mg/L(常州)至 0.84 ± 0.18 mg/L(无锡),最高值无锡惠山站比最低值常州站高 80%. NO₃⁻-N 的空间变化较大,NO₃⁻-N 年均浓度变异系数达 36%,是 NH₄⁺-N 变异系数两倍多.

大气氮沉降的通量受氮的排放量的支配,氮沉降与氮排放呈线性关系^[7].雨水中的 NH₄⁺ 其前体是大气中的 NH₃, NH₃ 主要来源于农业活动(动物废物和施肥)和工业的排放;雨水中的 NO₃⁻ 其前体是大气中的 NO_x, NO_x 主要来源于汽车尾气、核电厂.由于土壤微生物的活动,土壤释放也是大气 NO_x 的一个来源.比较 TIN 的空间变化不难发现,雨水样品中的 TIN 含量的高低受当地的经济水平发展和当地农业活动的影响.苏州、无锡的经济相对于常州、湖州来说发展程度高,其 TIN 的排放量也比较高,尤其是 NO₃⁻-N 因受汽车尾气排放的影响,其含量明显的比其它城市站点高.非城市站点中,降水中 TIN 的浓度受局地影响很大,拖山站设在居民菜园地,由于受强烈的农业活动的影响, NH₄⁺-N 的浓度最高.太湖站周围植被较好,反硝化作用比较强, NO₃⁻-N 浓度较高.东山站采样点设于鱼塘埂上,由于周围水域开阔,无局地工业和交通污染源的影响,局地空气中的 NH₃、NO_x 浓度相对来说比较低,反映在年均 TIN 浓度较低.总的说来,各采样点雨水中氮的浓度比国外现有的资料高^[8],与国家酸雨监测网监测的结果^[9]基本一致.进一步分析各站点 TIN 月均浓度,发现其浓度随月变化不显著,有可能是太湖大气污染物有多个源,受多个源的复合影响,其浓度没有显著的季节性变化,但真正原因还有待于进一步的研究.

2.2 太湖周边地区大气氮湿沉降通量

湿沉降通量 F_w 可用月(季、年)雨量加权平均浓度与该月(季、年)总降雨量的乘积求得: $F_w = C_{wi} \times R_i$, 其中, C_{wi} 是污染物的月(季、年)均浓度(mg/L), R_i 是月(季、年)降雨量(mm).从月沉降通量看,各个站点 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的湿沉降通量趋势一致,各站点的月沉降量与月降雨量具有很好的相关性. TIN 月沉降

量与月降雨量的相关系数($Y = Ax + b$, $n = 12, R^2 > 0.65$). 当然氮沉降量与氮的排放量密切相关^[7], 由于太湖周边地区自然环境条件好, 工农业比较发达, 氮的来源也比较复杂, 本文没有探讨氮的来源. 从年湿沉降通量来看(表2), 环湖 TN 湿沉降通量变化范围为 1712.9 - 3651.7 kg/km², 均值为 2806.8 ± 231.0 kg/km², NH₄⁺-N 沉降通量为 1458.8 ± 101.6 kg/km², 范围是 1065.1 - 1812.5 kg/km²; NO₃⁻-N 为 174.7 kg/km² - 827.5 kg/km², 均值为 631.7 ± 87.5 kg/km². 各站点湿沉降中 NH₄⁺-N 沉降通量占总 TIN 沉降通量的 62.5% - 85.9%, 也就是说, 每年每点 NH₄⁺-N 沉降通量是该点 NO₃⁻-N 沉降通量的 2 - 6 倍, 这一研究结果与 Morales 估算 Lake Maracaibo 的结果一致(3 - 6 倍)^[8]. 降雨中 TIN 沉降通量在 TN 沉降通量中占有相当大的比例, 平均值高达 78.8%, 其范围为 65.3% - 86.2%. ; TON(TON = TN - TIN) 沉降通量非城市站点较高, 拖山站和东山站 TON 的沉降量约占 TN 的 33%(表2). 总的说来, TIN 在湿沉降中占有的比例比较高, 而 TIN 可被浮游植物直接利用, 这无疑对藻类生长有促进作用. 从季节上来看(图2), 太湖周边地区溶解性 TIN 的沉降率具有季节性变化的特点, 夏季的沉降率大, 其次春季, 冬秋季相对来说较低, 这种季节性分布特点无疑能促进藻类的大量的生长. 在夏季, 由于温度比较高, 藻类大量的生长繁殖, 水体中的氮明显下降, 大气氮输送可缓解水体中氮的缺乏.

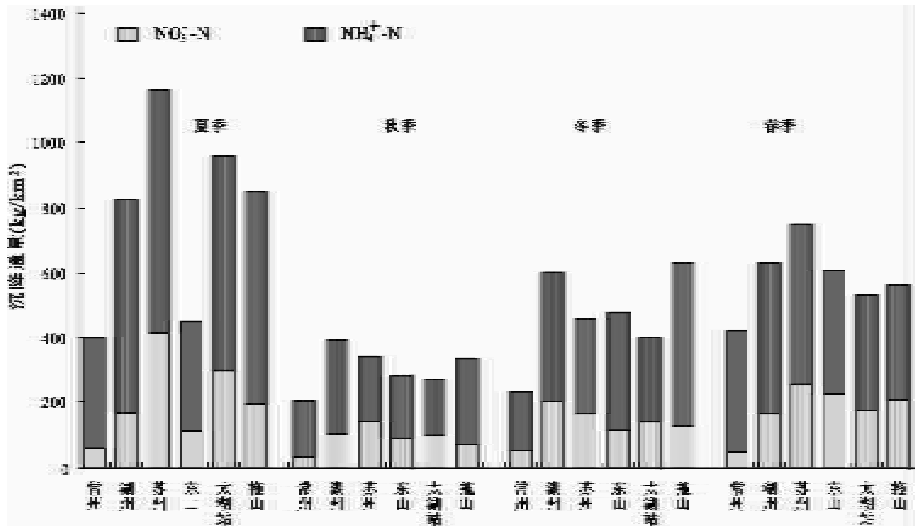


图2 太湖周边地区氮沉降通量的的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of N deposition flux around Lake Taihu

表2 太湖周边地区氮沉降率

Tab.2 Nitrogen deposition rates around Lake Taihu

	雨量 (mm)	TN (kg/(km ² ·a))	NH ₄ ⁺ -N (kg/(km ² ·a))	NO ₃ ⁻ -N (kg/(km ² ·a))	TIN (kg/(km ² ·a))	TON (kg/(km ² ·a))	TIN/TN (%)
太湖站	985.1	2514.9	1418.5	748.9	2167.2	347.8	86.2
拖山站	985.1	3651.6	1812.5	669.9	2482.4	1169.3	68.0
东山站	1031.5	2702.5	1237.8	526.1	1763.9	938.7	65.3
湖州	1274.4	3256.0	1758.7	624.5	2383.1	872.9	73.2
常州	832.1	1712.9	1065.1	174.7	1239.8	473.1	72.4
无锡	985.1	2821.2	1379.1	827.5	2206.6	614.7	78.2
苏州	1149.3	2988.1	1540.0	850.5	2390.5	597.7	80.0
平均	1034.6	2806.8	1458.8	631.7	2090.5	716.3	78.8
SD	140.9	611.2	268.8	231.4	443.3	288.3	9.6
Cv(%)	13.6	21.8	18.4	36.6	21.2	40.2	12.2

1) 无锡、拖山降雨量用的是太湖站的降水资料.

2.3 大气氮湿沉降入湖量的估算

进入湖泊营养盐的来源有入湖的河流输送、大气沉降输送、点源污染输送、地下水的涌出输送等,目前国内外仅对河流入湖量研究较多. 本文利用2002年7月至2003年6月测定的太湖周边地区大气氮湿沉降率均值进行估算,太湖水面面积按2338 km²计,则TN的年沉降负荷为6562.2 t, NH₄⁺-N为3410.7 t, NO₃⁻-N为1476.8 t, TIN为4887.5 t, TON为1674.7 t. 入湖的大气湿沉降量中TIN约占74.5%, TIN能被浮游植物直接利用,尤其是夏季,在营养盐相对比较低的湖心区,大气沉降的输入显得更为重要. 从降水入湖TN负荷来看,在经济高速发展的今天,环太湖大气降水的TN浓度比十五年前高约3倍^[10]. 根据2000年入湖TN资料,并把大气降水直接入湖TN换成本次大气降水入湖TN,大气降水直接向太湖水面输送的TN污染物占总入湖量的13.6%. 如此增长的太湖主要的污染物,将使湖水污染呈上升趋势. 考虑到太湖是个吞吐型湖泊,水交换系数大约300d,水的补给主要是流域降水. 此外,大气降水除直接向太湖湖泊生态系统输送营养物质外,通过干沉降直接向水体输送营养物质也相当可观. 据香港合作的同期研究报告^①表明,氮的干沉降通量(气体沉降+气溶胶沉降)是湿沉降通量的2倍. 也就是说大气干湿沉降直接入湖TN约占入湖TN的40%,再加上通过径流间接的向太湖水体生态系统输送大量的营养物质,太湖流域电力等能源供应的增长,汽车、船舶等陆、水运输能力的扩张,化肥农药使用等面源污染的强化等人类活动强度的日益加大,大气面源污染及传输造成的氮磷营养元素湿沉降作用对太湖水体生态系统富营养化的影响不容忽视.

表3 太湖湖面降水输入TN的负荷量

Tab. 3 Direct loading of inputting TN by atmospheric wet deposition to the lake within lake area

入湖 TN (t)	降雨量 (mm)	TN 浓度 (mg/L)	湖面降水 TN (t/a)	TN _{降水} /TN _{入湖} (%)	时间
41311.70	1428.9	0.93	2750.0	6.7	1987年4月-1988年3月 ^[10]
45943.98	1034.6	2.71	6562.2	13.6	2002年6月-2003年7月

致谢:本研究样品测定得到南京大学污染控制国家重点实验室王晓蓉教授、罗军同学的大力的支持和协作;入湖TN由南京地理与湖泊研究所黄文钰副研究员提供;无锡、苏州、湖州、常州等市降水样品是由各市国家环境保护局组织人员进行采集,在此深表谢意.

3 参考文献

- [1] Park S U, Lee Y H. Spatial distribution of wet deposition of nitrogen in South Korea. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (4):619-628.
- [2] 王保栋,单保田. 黄、渤海 TIN 的收支模式初探. *海洋科学*, 2002, **26**(2): 33-36.
- [3] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展. *湖泊科学*, 1998, **10**(4):1-9.
- [4] 金相灿,屠清英主编. 湖泊富营养化调查规范. 北京:中国环境科学出版社, 1990:160-164
- [5] 杨龙元,秦伯强等,酸雨对太湖水环境潜在影响的初步研究. *湖泊科学*, 2001, (2): 135-142.
- [6] 杨晓红. 南太湖地区酸雨现状及防治对策. *湖州师范学院学报*, 2001, **23**(3):68-72.
- [7] Bartnicki J, Alcamo J. Calculating nitrogen deposition in Europe. *Water, Air & Soil Pollution*, 1989, **47**(2):101-123.
- [8] Morales JA, Albornoz A, Socorro E, et al. An estimation of the nitrogen and phosphorus loading by wet deposition over Lake Maracaibo, Venezuela. *Water, Air & Soil Pollution*, 2001, **128**:207-221.
- [9] 王文兴,丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布. *环境科学研究*, 1997, **10**(3):1-6.
- [10] 孙顺才,黄漪平主编. 太湖. 北京:海洋出版社, 1993:199-200.

① Yang Hong. Water Quality Impact of Atmospheric Input of Nitrogen and Phosphorus 2004.05 (课题报告)