

# 旅游活动对黄龙景区磷酸盐浓度和水藻生长的影响

张金流, 王海静, 刘再华

中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002

**摘要:** 由于其独特的钙华景观, 黄龙风景区从 1992 年被联合国教科文组织列入世界自然遗产名录以来, 每年吸引数以十万甚至百万计的国内外游客前来游览; 然而, 可能由于旅游活动的影响, 近年来黄龙钙华景观出现了诸多形式的退化, 水藻加速生长钙华黑化即是其表现形式之一。为了阐明这一退化现象是否与旅游活动有关, 从 2010 年 5 月底到 11 月初的丰水时段, 采用野外自动监测和室内分析相结合的方法, 对溪流水藻叶绿素含量和水中的磷酸盐浓度变化进行了研究。结果发现, 随着景区游客人数的增减, 水中磷酸盐浓度呈现出与之一致的变动趋势; 同时, 叶绿素与磷酸盐间也呈现出明显一致的变动趋势。因此, 我们认为, 旅游活动增加了黄龙景区的磷酸盐浓度, 并促进了水藻的生长, 这很可能是黄龙水藻近年来加速生长的重要原因, 值得引起有关方面的高度关注。

**关键词:** 景观退化; 旅游活动; 磷酸盐; 水藻生长; 四川黄龙

中图分类号: S759.92; X172 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.04.10

## The Impact of Tourist Activities on $\text{PO}_4^{3-}$ Concentrations and Aquatic Algae Growth at the Huanglong Scenic Spot, Sichuan Province

ZHANG Jin-liu, WANG Hai-jing, LIU Zai-hua

State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002

**Abstract:** The Huanglong scenic spot, well known for its unique natural landscape, was listed by UNESCO in 1992 as an entry in the World's Nature Heritage, and has attracted tens of thousands of tourists from various counties of the world every year. Due probably to the impact of tourist activities in recent years, Huanglong travertine landscape has shown serious degradations, one of which is the accelerated algae propagation and travertine darkness. To understand whether this degradation has relation with tourist activities, the authors used automatic logging in field combined with laboratory analysis in the wet period of 2010 from late May to early November to study temporal variations in algae chlorophyll concentration and phosphate concentration in stream water. The results show that, with the increase or decrease of tourist number, the phosphate concentration shows the same change trend, and so does the chlorophyll concentration. Therefore, it is concluded that the tourist activities have affected the phosphate concentration in Huanglong stream water, and the latter promotes the algae growth. This may be the main reason why algae has shown accelerated growth in recent years.

**Key words:** landscape degradation; tourist activity; phosphate; aquatic algae growth; Huanglong in Sichuan

黄龙自然风景区由于其独特的钙华景观(钙华池、钙华瀑布以及钙华滩流), 于 1992 年被联合国教科文组织列入世界自然遗产名录, 每年吸引数以十

万甚至百万计的国内外游客前来游览; 游客人数从 90 年代初的年均约 10 万人增长到近年来的 100 余万人(如 2010 年超过 110 万); 随着游客人数的逐年

本文由中国科学院“百人计划”项目(编号: 2006-067)和国家自然科学基金项目(编号: 40872168)联合资助。

收稿日期: 2011-05-09; 改回日期: 2011-06-01。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 张金流, 男, 1974 年生。博士研究生。主要从事生物地球化学研究。E-mail: zhanggolden@163.com。

通讯作者: 刘再华, 男, 1963 年生。研究员。主要从事岩溶水文生物地球化学与全球变化研究。E-mail: liuzaihua@vip.gyig.ac.cn。

增长,景区内餐饮、住宿以及购物等服务业也获得了迅速发展,每年旅游及相关产业带来的收入在十亿元人民币以上,成为国家和地方政府收入的重要来源。然而,近年来黄龙钙华景观出现了明显的退化现象(杨俊义等, 2004; 杨俊义, 2004; 郭建强, 2005; 单莉莉等, 2006; 刘再华等, 2009), 其表现形式之一是: 水藻加速生长, 死亡后附着钙华表面, 使得钙华表面由黄变黑, 大大影响了黄龙钙华景观整体美感, 游客对此强烈不满; 同时, 据相关研究(Carolyn et al., 1995; Viles et al., 2000; Shiraiishi et al., 2008; Martinez et al., 2010)及卢国平等(Lu et al., 2000)在此处的研究, 水生藻类会侵蚀已有钙华, 减缓新的钙华沉积。因此, 为了黄龙钙华景观得以永续利用, 急需对景观上述退化现象的机理性问题展开研究。

众所周知, 在淡水生态系统中, 磷酸盐往往是水藻生长的限制性营养盐(王勇等, 2000), 可以促进水藻的生长(Prairie et al., 1989; McCauley et al., 1989; Seip et al., 1994; Klausmeier et al., 2004; 刘春光等, 2006; 孙凌等, 2006; 罗固源等, 2007; 李建平等, 2007; Dongseon et al., 2009), 因此, 黄龙水藻近年来的加速生长, 很可能与迅速增强的旅游活动所导致的溪流水水质受到磷酸盐污染有关(刘再华等, 2009; 王海静, 2009; 张金流等, 2010)。为了证实上述推测, 我们从2010年4月底到11月初的丰水时段, 采用现场采样、自动监测和室内分析相结合的方法, 对水中溶解磷酸盐、水藻叶绿素含量(作为水

生藻类生物量的替代指标)变化做了一个旅游周期的监测, 以期揭示黄龙水藻加速生长的真正原因。

## 1 研究区概况

黄龙风景区位于四川省成都市西北约 360 km 的阿坝藏族羌族自治州松潘县境内, 属于青藏高原东部边缘向四川盆地的过渡地带; 黄龙沟景区全长 3.5 km, 南起望乡台, 北至涪江河谷, 海拔从 3100 m 到 3600 m 不等; 钙华沉积物宽度约 250 m, 从远处观看整个景区就似一条黄色的蛟龙, 故取名黄龙沟。黄龙沟泉水补给区岩层以泥盆-石炭系灰岩、白云岩为主(Liu et al., 1995), 为钙华形成提供了丰富的钙源。景区内年均降雨量约 759 mm, 年均气温在 1.1℃, 属高寒岩溶区。黄龙沟地表溪流主要由南起望乡台的断层泉组黄龙泉(S1)和沿途三个大的二次转化泉(S2~S4)补给(李前银等, 2009; 王海静等, 2011)。如图 1 所示。

## 2 实验方法

### 2.1 磷酸盐水样采集和室内分析

为了获取五彩池、激湍湖和迎宾池三个监测点(即图 1 中的 W、L 和 Y 处)水中磷酸盐浓度的时间变化规律, 每隔 10 天左右, 我们用注射器和装有 0.45 μm 玻璃纤维滤膜的过滤器采集水样, 盛于 60 ml 聚乙烯塑料瓶中, 定期带回中科院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 用离子色谱(美国戴安公司 ICS90 型色谱)分析水中的磷酸盐含量。采

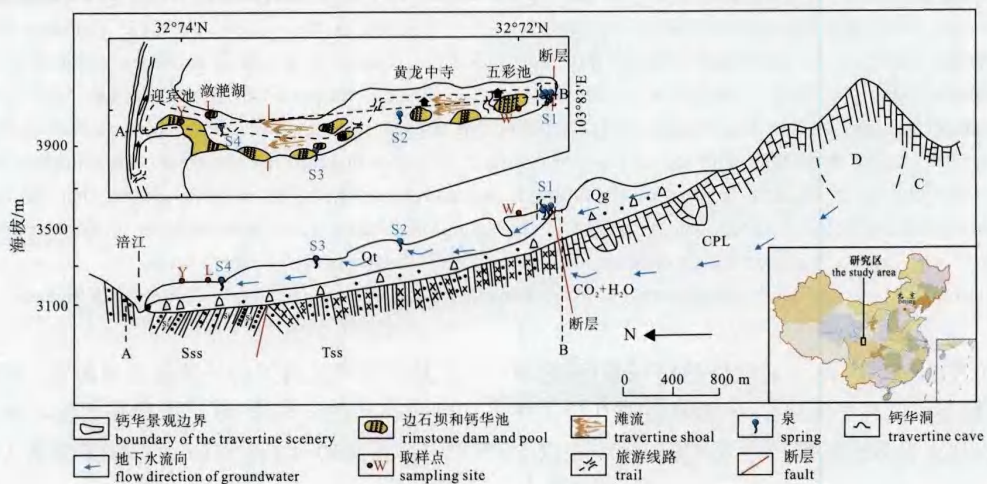


图 1 黄龙钙华形成的水文地质条件剖面图及平面图和取样点

Fig. 1 Plan and geological section of Huanglong Ravine with springs and sampling sites

Qt/Qg-第四系钙华/冰碛砂及砾石; Tss-三叠系凝灰质砂岩、板岩; CPL-石炭-二叠系灰岩;

D-泥盆系板岩夹灰岩; Sss-志留系硅质板岩夹砂岩

Qt/Qg-Quaternary travertine/glacial sand and gravel; Tss-Triassic sandstone and slate; CPL-Carboniferous and Permian limestone;

D-Devonian slate and limestone; Sss-Silurian slate intercalated with sandstone

集样品前, 盛样品的聚乙烯瓶子用 1: 10 硝酸浸泡 24 小时, 之后用超纯水清洗三次, 再用超纯水浸泡 48 小时, 然后在 50℃ 条件下用烘箱烘干 24 小时。

### 2.2 水藻生物量的自动监测(用叶绿素作为替代指标)

我们知道, 叶绿素 a 大约占水藻生物量的 1% ~ 2%(吕洪刚等, 2005; 戴荣继等, 2006; 丛海兵等, 2007), 因此, 水中水藻叶绿素浓度的变化在某种程度上可以反映水藻生物量的变化。在本研究中, 为了获取激湍湖水中叶绿素浓度的时间变化规律, 我们于湖中安装一台德国产多参数水质自动记录仪(型号: SEBA MPS572), 从 2010 年 7 月 11 日到 11 月 7 日, 用其自动记录水中叶绿素浓度的变化。该仪器叶绿素浓度的测试范围是 0.03 ~ 500  $\mu\text{g/l}$ , 测试时间间隔设置为 15 分钟。

### 2.3 降雨量的记录

降雨量用安装于黄龙沟激湍湖边的 HOBO 小气象站自动记录, 其测试精度为 0.2 mm, 测试时间间隔同样设置为 15 分钟。

## 3 结果和讨论

### 3.1 旅游活动对黄龙沟溪流水磷酸盐浓度的影响

图 2 显示了黄龙沟景区上游五彩池和下游迎宾池两处水中磷酸盐浓度在实验期间的变化。五彩池和迎宾池两采样点磷酸盐浓度在整个实验期间的变化趋势基本一致, 因此, 下面以五彩池为例来详细分析水中磷酸盐浓度和游客人数及降雨量间的关系。

由图 2 可知, 五彩池水中磷酸盐浓度与游客人数呈现明显的正相关变化趋势, 例如, 与游客人数四个峰值(图中分别由四个向下的箭头所指示)相对应, 水中磷酸盐浓度也相应呈现出四个峰值, 说明人类旅游活动已对黄龙磷酸盐浓度产生了影响。

同时, 由图可知, 水中磷酸盐浓度变化往往滞后于游客人数的变化(见图中磷酸盐浓度峰值与游客人数峰值间的连线)。例如, 从 7 月 28 日到 8 月 29 日, 水中磷酸盐浓度一直在增加, 之后开始下降, 直到 9 月 18 日, 而与之相对应的游客人数早在 8 月 7 日就达到了高峰, 而后开始下降, 直到 9 月 1 日, 分别比磷酸盐浓度峰值和谷值出现日期早了 22 天和 17 天。出现这种现象的原因可能是在之前的 7 月 17 日至 8 月 16 日期间, 黄龙景区游客人数处于 2010 年整个旅游季节高峰时段(日平均人数在 1 万左右, 最高峰达 11514 人), 导致较多的含有可溶性磷酸盐

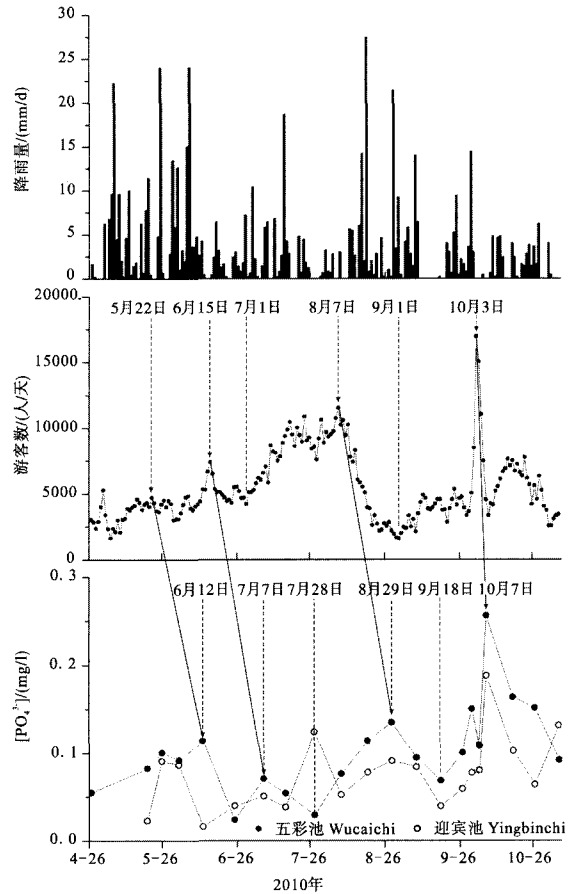


图 2 五彩池和迎宾池处水中磷酸盐浓度的时间变化及其与游客人数和降雨量的关系(游客人数来源于黄龙风景区管理局)

Fig. 2 Temporal variation in phosphate concentration at Wucaichi sampling site and Yingbinchi sampling site (site W and Y in Fig. 1) and its relationship with tourist number and rainfall(the tourist numbers are provided by the Huanglong National Scenic Spot Administration)

的固体垃圾(如方便食品等)和餐饮垃圾(来自景区饭店)进入景区, 但此期间降雨相对偏少, 大部分可溶性磷酸盐因得不到雨水冲刷、溶解而暂时保存在固体垃圾中; 8 月 16 日之后, 降雨量逐渐增加, 前期未溶解的磷酸盐在雨水冲刷作用下才又开始溶解并进入溪流水, 导致水中磷酸盐浓度继续上升。因此, 正是这种滞后的雨水冲刷、溶解过程致使磷酸盐浓度峰值比游客人数峰值滞后了 22 天; 9 月 1 日后, 游客人数又开始逐渐增加, 但溪流水中磷酸盐浓度仍然保持下降, 这是因为此时降雨仍然很强, 且游客人数增长幅度很小, 因而景区溪流水中由于旅游活动导致的磷酸盐浓度的增加不足以抵消雨水对磷酸盐的冲刷、稀释作用, 因而总的效果仍是水中磷酸盐浓度下降。

9 月 18 日后, 在降雨量减少以及游客人数(旅游活动强度)持续增加两因素共同作用下, 水中磷

酸盐浓度又开始逐渐增加,特别是在国庆节期间,黄龙景区日游客人数达到了全年的峰值(10月3日游客人数为16929),水中磷酸盐浓度也达到了整个实验周期的峰值;国庆后,随着游客人数的逐渐减少,水中磷酸盐浓度也逐渐下降直到我们野外工作结束。

对于迎宾池采样点,从图2可以清楚地看出,水中磷酸盐浓度和旅游活动及降雨量的关系总体与五彩池采样点类似;但我们也注意到几点异常之处,例如在7月28日,五彩池处水中磷酸盐浓度处于低谷,而迎宾池处水中磷酸盐浓度却处于峰值,两处正好相反,出现这种现象很可能是游客在景区内各景点分布往往不均匀,从而对各点水质产生影响的强度也不尽相同的结果。

需要说明的是,与我们以前研究相比(Wang et al., 2010),由图2可知,下游迎宾池处水中磷酸盐浓度反而比上游五彩池采样点处稍低,这可能是沿途二次转化泉(见图1中的S2~S4)对其不断稀释和水生植物不断吸收利用的共同结果。

总之,从上面的分析可知,黄龙景区水中磷酸盐浓度变化是旅游活动和降雨两个因素共同作用的结果,而其来源则源于旅游活动。

### 3.2 水中溶解磷酸盐促进水藻的生长

图3显示了激湍湖取样点水中叶绿素浓度时间变化以及同期水中溶解磷酸盐浓度、降雨量和游客人数。

从图中可以看到,在整个实验周期,水中磷酸盐呈现明显的四个变化周期(分别由图3中四条粗虚线隔开),即先上升后下降;与之相对应,水藻叶绿素浓度也呈现出与之一致的四个变化周期,因此可以断定,水中磷酸盐对水藻的生长可能起着重要的促进作用。

从图中我们也注意到,叶绿素浓度变化往往也滞后于磷酸盐浓度变化,例如在7月28日和10月7日,水中磷酸盐分别达到了变化周期的最高值,对应的叶绿素则分别在8月6日和10月13日才达到峰值;这可能是两方面的原因:首先,磷酸盐样品的采样方法是瞬时采样,不能像叶绿素自动监测那样精确反映水中磷酸盐浓度的详细变化,所以,水中磷酸盐有可能在7月28日和10月7日采样日后会继续上升,从而继续促进水藻生长;其次,叶绿素反映的是水生藻类的生物量,其变化是一个生物过程,因此,其变化速度不可能像化学反应那样精确对应反应物浓度。因此,叶绿素浓度变化滞后于

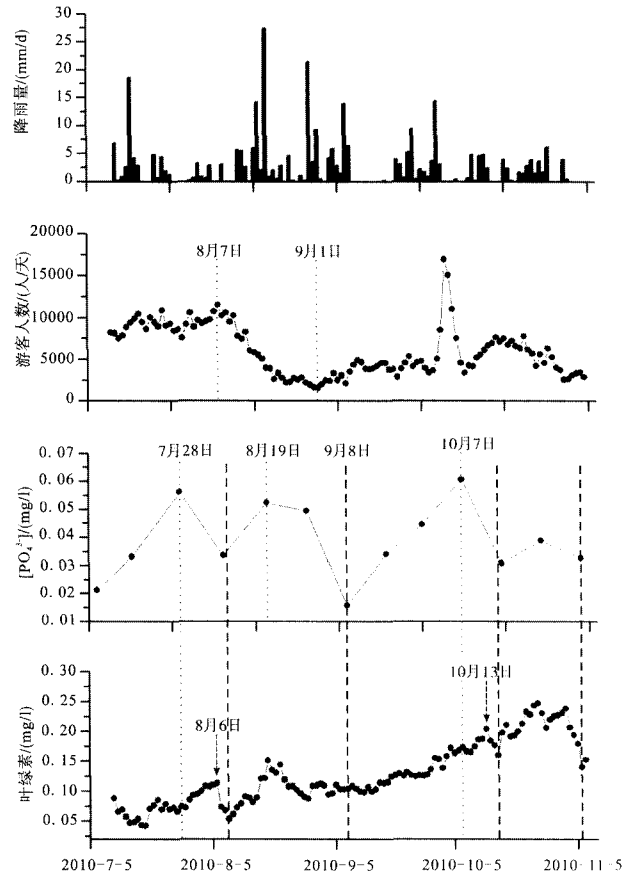


图3 激湍湖水中叶绿素浓度的时间变化及其与水中磷酸盐浓度的关系

Fig. 3 Temporal variation in chlorophyll concentration at Lianyan pool sampling site (site L in Fig. 1) and its relationship with phosphate concentration in water

磷酸盐浓度变化并不能否定磷酸盐对水藻生长的促进作用,相反,这正是磷酸盐促进水藻生长的正常表现。

从图中磷酸盐浓度与游客人数间变化趋势关系可以看出,此处磷酸盐浓度变化趋势与五彩池和迎宾池两个采样点相似,如对应游客人数的几个峰值,磷酸盐浓度也同样呈现出几个高峰;相对于游客人数的变化,磷酸盐浓度也同样呈现出一定的滞后现象,如8月7日,游客人数开始下降,直到9月1日到达低谷,而磷酸盐直到8月19日才开始下降,一直到9月8日。因此我们可以断定,与五彩池和迎宾池两处相同,激湍湖采样点水中磷酸盐浓度的变化同样是旅游活动影响的结果。

## 4 结论

对2010年黄龙风景区整个旅游季节水中溶解磷酸盐采样和室内分析后发现,随着游客人数的增减,水中磷酸盐浓度呈现与之一致的变化趋势,说明旅游活动已对黄龙溪流水水质产生了明显的影响;

同时,在对比磷酸盐浓度与涪滩湖水藻叶绿素含量间的关系后发现,黄龙溪流水磷酸盐对水藻生长有着明显的促进作用。因此可以推断,旅游活动增加了溪流水的磷酸盐浓度很可能就是近年来黄龙沟水藻加速生长的重要原因,应引起有关方面的高度重视。

## 参考文献:

丛海兵, 黄廷林, 周真明, 何文杰, 韩宏大. 2007. 藻类叶绿素测定新方法[J]. 给水排水, 33(6): 28-32.

戴荣继, 佟斌, 黄春, 王蕾. 2006. HPLC 测定饮用水中藻类叶绿素含量[J]. 北京理工大学学报, 26(1): 87-89.

单莉莉, 覃建雄, 张瑞英. 2006. 九寨沟黄龙景区地质景观成景及可持续发展策略探讨[J]. 国土资源科技管理, (6): 88-91.

郭建强. 2005. 四川九寨沟、黄龙钙华景观保护研究[J]. 四川地质学报, 25(1): 23-25.

李建平, 吴立波, 戴永康, 王启山, 王嵩, 张丽彬. 2007. 不同氮磷比对淡水藻类生长的影响及水环境因子的变化[J]. 生态环境, 16(2): 342-346.

李前银, 范崇荣. 2009. 黄龙景区水循环系统与景观演化研究[J]. 水文地质工程地质, (1): 108-112.

刘春光, 金相灿, 孙凌, 孙红文, 朱琳, 于洋, 戴树桂, 庄源益. 2006. 不同氮源和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 环境科学, 27(1): 101-104.

刘再华, 田友萍, 安德军, 王海静, 唐淑, 张金流, 孙海龙, 刘彦, 张清明. 2009. 世界自然遗产——四川黄龙钙华景观的形成与演化[J]. 地球学报, 30(6): 841-847.

吕洪刚, 张锡辉, 郑振华, 欧阳二明. 2005. 原水藻与叶绿素 a 定量关系的研究[J]. 给水排水, 31(2): 26-31.

罗固源, 朱亮, 季铁军, 唐刚, 康康. 2007. 不同磷浓度和曝气方式对淡水藻类生长的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 30(2): 86-88.

孙凌, 金相灿, 钟远, 张冬梅, 朱琳, 戴树桂, 庄源益. 2006. 不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J]. 应用生态学报, 17(7): 1218-1223.

王海静, 张金流, 刘再华, 台永东. 2011. 基于水化学和同位素特征的四川黄龙沟泉群分类研究[J]. 地球学报, 32(3): 367-372.

王海静. 2009. 四川黄龙沟钙华沉积溪流的水化学和同位素的时空变化研究[D]. 重庆: 西南大学.

王勇, 焦念志. 2000. 营养盐对浮游植物生长上行效应机制的研究进展[J]. 海洋科学, 24(10): 29-33.

杨俊义, 万新南, 席彬, 蔡永寿, 蹇代君, 朱忠福, 董立, 杨宝林, 石磊, 程华稔, 唐淑. 2004. 九寨沟黄龙地区钙华漏斗的特

征与成因探讨[J]. 水文地质工程地质, (2): 90-93.

杨俊义. 2004. 九寨沟黄龙地区钙华的特征与成因探讨[D]. 成都: 成都理工大学.

张金流, 刘再华. 2010. 世界遗产——四川黄龙钙华景观研究进展与展望[J]. 地球与环境, 38(1): 79-84.

## References:

- CAROLYN R H, BARRY C S L, MAUREEN E C. 1995. Effect of inhibitors on calcium carbonate deposition mediated by freshwater algae[J]. Journal of Applied Phycology, 7(4): 367-380.
- CONG Hai-bin, HUANG Ting-lin, ZHOU Zhen-ming, HE Wen-jie, HAN Hong-da. 2007. A new measurement method for chlorophylls[J]. Water & Wastewater Engineering, 33(6): 28-32(in Chinese with English abstract).
- DAI Rong-ji, TONG Bin, HUANG Chun, WANG Lei. 2006. Determination of chlorophylls in Drinking Water by HPLC[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 26(1): 87-89(in Chinese with English abstract).
- DONGSEON K, SANG H C, KYUNG H K, JEONGHEE S, SINJAE Y, CHUL H K. 2009. Spatial and temporal variations in nutrient and chlorophyll-a concentrations in the northern East China Sea surrounding Cheju Island[J]. Continental Shelf Research, 29(1): 1426-1436.
- GUO Jian-qiang. 2005. On protection of travertine landscape in the Jiuzhai valley and Huanglong scenic spots[J]. Acta Geologica Sichuan, 25(1): 23-25(in Chinese with English abstract).
- KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, SIMON A LEVIN. 2004. Optional nitrogen-to phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 429: 171-174.
- LI Jian-ping, WU Li-bo, DAI Yong-kang, WANG Qi-shan, WANG Song, ZHANG Li-bin. 2007. Effects of different nitrogen-phosphorus ratio on the freshwater phytoplankton growth and the variations of environmental factors[J]. Ecology and Environment, 16(2): 342-346(in Chinese with English abstract).
- LI Qian-yin, FAN Chong-rong. 2009. A study of water circulation system and landscape evolution of Huanglong scenic spot[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (1): 108-112(in Chinese with English abstract).
- LIU Chun-guang, JIN Xiang-can, SUN Ling, SUN Hong-wen, ZHU Lin, YU Yang, DAI Shu-gui, ZHUANG Yuan-yi. 2006. Effects of Nitrogen Source and Aeration Mode on Algae Growth in Freshwater[J]. Environmental Science, 27(1): 101-104(in Chinese with English abstract).

- LIU Z, SVENSSON U, DREYBRODT W, YUAN D, BUHMANN D. 1995. Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measures and theoretical prediction of deposition rates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3087-3097.
- LIU Zai-hua, TIAN You-ping, AN De-jun, WANG Hai-jing, TANG Shu, ZHANG Jin-liu, SUN Hai-long, LIU Yan, ZHANG Qing-ming. 2009. Formation and evolution of the travertine landscape at Huanglong, Sichuan, one of the world natural heritages[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 841-847(in Chinese with English abstract).
- LU G, ZHENG C, DONAHOEA R J, BERRY LYONS W. 2000. Controlling processes in a  $\text{CaCO}_3$  precipitating stream in Huanglong Natural Scenic District, Sichuan, China[J]. *Journal of Hydrology*, 23: 34-54.
- LÜ Hong-gang, ZHANG Xi-hui, ZHEN Zhen-hua, OUYANG Er-ming. 2005. The study of quantitative relationship between raw water algae and chlorophyll a[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 31(2): 26-31(in Chinese).
- LUO Gu-yuan, ZHU Liang, JI Tie-jun, TANG Guang, KANG Kang. 2007. Effects of Different P Concentration and Aeration Partens on Growth of Algae in Freshwaters[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 30(2): 86-88(in Chinese with English abstract).
- MARTINEZ R E, GARDÉS E, POKROVSKY O S, SCHOTT J, OELKERS E H. 2010. Do photosynthetic bacteria have a protective mechanism against carbonate precipitation at their surfaces?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 1329-1337.
- MCCAULEY E, DOWNING J A, WATSON S. 1989. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes[J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46: 1171-1175.
- PRAIRIE Y T, DUARTE C M, KALFF J. 1989. Unifying nutrient-chlorophyll relationship in lakes[J]. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46: 1176-1182.
- SEIP K L, GOLDSTEIN H. 1994. Different responses to change in phosphorous, P, among lakes, A study of slope in  $\text{chl-}\alpha=f(\text{P})$  graphs[J]. *Hydrobiologia*, 286: 27-36.
- SHAN Li-li, QIN Jian-xiong, ZHANG Rui-ying. 2006. A discussion on formation of Jiuzhaigou-Huanglong geologic sight and sustainable development strategy[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, (6): 88-91(in Chinese with English abstract).
- SHIRAIISHI F, REIMER A, BISSETT A, BEER D D, ARP G. 2008. Microbial effects on biofilm calcification, ambient water chemistry and stable isotope records in a highly supersaturated setting (Westerhöfer Bach, Germany)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 262: 91-106.
- SUN Ling, JIN Xiang-can, ZHONG Yuan, ZHANG Dong-mei, ZHU Lin, DAI Shu-gui, ZHUANG Yuan-yi. 2006. Changes of algal communities in water body with different proportion of nitrogen and phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17(7): 1218-1223(in Chinese with English abstract).
- VILES H A, SPENCER T, TELEKI K, COX C. 2000. Observations on 16 years of microfloral recolonization data from limestone surfaces, aldraba atoll, Indian ocean: implications for biological weathering[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1355-1370.
- WANG H, LIU Z, ZHANG J, SUN H, AN D, FU R, WANG X. 2010. Spatial and temporal hydrochemical variation of the spring-fed travertine-deposition stream in the Huanglong Ravine, Sichuan, SW China[J]. *Acta Carsologica*, 39(2): 247-259.
- WANG Hai-jing, ZHANG Jin-liu, LIU Zai-hua, TAI Yong-dong. 2011. Classification of Spring Groups Based on Hydrochemical and Isotopic Features at Huanglong Ravine[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(3): 367-372(in Chinese with English abstract).
- WANG Hai-jing. 2009. Study on the Spatio-temporal Variations of Hydrochemistry and Stable Isotopes at Huanglong in Sichuan, China[D]. Chongqing: Southwest University(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong, JIAO Nian-zhi. 2000. Research progress in nutrient bottom-up effect on phytoplankton growth[J]. *Marine Sciences*, 24(10): 29-33(in Chinese).
- YANG Jun-yi, WAN Xin-nan, XI Bin, CAI Yong-shou, JIAN Dai-jun, ZHU Zhong-fu, DONG Li, YANG Bao-lin, SHI Lei, CHENG Hua-nian, TANG Shu. 2004. Characteristics and formation of the travertine funnels in the Jiuzhaigou-Huanglong area[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (2): 90-93(in Chinese with English abstract).
- YANG Jun-yi. 2004. Characteristics and formation of the travertine in Jiuzhaigou-Huanglong area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jin-liu, LIU Zai-hua. 2010. Progress and future prospect in research on the travertine landscape at Huanglong, Sichuan—a world's heritage site[J]. *Earth and Environment*, 38(1): 79-84(in Chinese with English abstract).