

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电催化矿化吡啶的影响与机制 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

Pantoea sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征

黄俊杰¹, 王超¹, 方博¹, 冯磊¹, 方芳^{1*}, 李哲², 郭劲松²

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘要: 选取了落干期澎溪河流域 6 个消落区点位, 分析了消落区土壤磷形态分布特征, 并探讨了各形态磷之间的相关性. 结果表明, ① 采用 SMT 法测定了消落区土壤总磷、无机磷和有机磷含量, 其总磷 TP 含量均值为 575.29 mg·kg⁻¹, 有机磷 OP 含量均值为 91.23 mg·kg⁻¹. ② 采用 Hedley 法分析了消落区土壤磷的 5 种赋存形态, 其中 WA-P_i、PA-P_i、Fe/Al-P_i 等 3 种易迁移的无机磷形态之和占可提取 P_i 的 11.61%, 且低于岸边土壤; WA-P_o、PA-P_o 两种生物可利用性较高的有机磷形态含量之和占可提取 P_o 的 22.28%, 而中活性有机磷 Fe/Al-P_o 占可提取 P_o 的 66.30%, 且消落区土壤各形态 P_o 含量均低于岸边土壤, 又以 Fe/Al-P_o 含量差异最大. ③ 消落区土壤 TP 与活性较强的 WA-P_i、PA-P_i 呈显著相关, 表明消落区土壤活性磷含量主要受 TP 影响; 各形态磷之间不具有显著相关性, 表明不同形态磷的来源可能不同; 消落区土壤 Fe/Al-P_i 与土壤有机质 OM 呈显著相关, 表明土壤有机质的含量可能影响铁铝结合态磷含量. 在淹水条件下, 消落区土壤磷组分的释放对上覆水体的潜在影响不容忽视.

关键词: 三峡库区; 消落区土壤; 有机磷; 无机磷; 形态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3673-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702204

Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir

HUANG Jun-jie¹, WANG Chao¹, FANG Bo¹, FENG Lei¹, FANG Fang^{1*}, LI Zhe², GUO Jin-song²

(1. College of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China)

Abstract: The concentrations of phosphorus fractions in the soils of the water-level-fluctuating zone (WLFZ) of Pengxi River in the Three Gorges Reservoir were analyzed. The total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), and organic phosphorus (OP) were studied using the standard measurement and test (SMT) procedure. The average TP concentration was 575.29 mg·kg⁻¹ and the average OP concentration was 91.23 mg·kg⁻¹ in the soils of WLFZ. The fractions of phosphorus were analyzed by the Hedley method. In the soils of WLFZ, the relative abundance of WA-P_i (weakly adsorbed inorganic phosphorus), PA-P_i (potential active inorganic phosphorus), and Fe/Al-P_i (Fe/Al-bound inorganic phosphorus) accounted for 11.61% of the extractable P_i, lower than that in the unflooded bankside soils. The relative abundance of WA-P_o (weakly adsorbed organic phosphorus) and PA-P_o (potential active organic phosphorus) accounted for 22.28% of the extractable P_o and the Fe/Al-P_o (Fe/Al-bound organic phosphorus) accounted for 66.30%. In addition, the P_o content of the soils of WLFZ was lower than that of the unflooded bankside soils and the difference in the Fe/Al-P_o content in both soil types was the highest. WA-P_i and PA-P_i were significantly correlated with TP in the soils of WLFZ, which indicated that the active phosphorus content was mainly affected by TP. There was no statistical correlation between different fractions of phosphorus, suggesting different sources of phosphorus fractions. The Fe/Al-P_i content was significantly correlated with OM, implying that the OM content may affect the Fe/Al-P_i content. Therefore, under flood conditions, the potential impacts of phosphorus in the soils of WLFZ on overlying water should not be neglected.

Key words: Three Gorges Reservoir; soils of WLFZ; organic phosphorus; inorganic phosphorus; fractions

磷素是水体富营养化的主要限制因素之一, 可通过地表径流、土壤侵蚀及渗漏淋溶等形式从土壤转移到河流、湖泊、水库等地表水体中, 成为水体富营养化的潜在因子. 土壤磷形态复杂, 主要分为有机磷和无机磷, 而根据提取剂的不同, 又可以进一步细分为不同的形态, 不同形态磷的释放机制、稳定性及生物有效性差异甚远^[1, 2]. 三峡水库蓄水以来, 因其冬季蓄水水位高, 夏季水位较低的运行特点, 在三峡库区形成了大面积的消落区. 消落区是水陆物质交换强烈的区域, 对水体磷的循环有着重

要影响^[3]. 三峡库区水位周期涨落会改变消落区土壤氧化还原电位、pH、矿物的物理性质、微生物群落的活性和结构等^[4, 5], 进而影响磷含量及其赋存形态.

目前, 有关于三峡库区消落区土壤磷赋存形态的研究, 多集中在总磷和无机磷方面^[6, 7], 鲜有文献

收稿日期: 2017-02-28; 修订日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430750, 51679226)

作者简介: 黄俊杰(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体富营养化和水处理, E-mail: huangjunjie_cq@163.com

* 通信作者, E-mail: fangfangcq@cqu.edu.cn

涉及有机磷. 因此, 本文采用 SMT 法和 Hedley 法表征了消落区土壤无机磷和有机磷, 着重分析了消落区土壤有机磷含量、形态及空间分布特征, 探讨了周期性干湿交替对消落区土壤有机磷的影响, 试图更为深入和全面地分析消落区土壤磷的特征. 这对理解水-土壤界面上不同形态磷的迁移与转化等地球化学行为, 对判断库区水体中磷的来源及其输入量, 以及如何控制库区水体富营养化有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 区域概况

本文选择的研究区域为三峡水库一级支流——澎溪河流域的消落区. 澎溪河流域位于三峡水库中部, 属四川盆地东部低山丘陵地带. 三峡水库冬季高水位, 夏季低水位的运行特点使澎溪河流域形成长度为 67.33 km、总面积达 56.60 km² 的消落区, 占三峡水库消落区总面积的 16.27%^[8], 澎溪河是三峡库区消落区面积最大的支流.

至 2010 年, 澎溪河流域总人口为 200.07 万人, 其中城镇人口 62.88 万人, 农业人口 137.18 万人, 澎溪河流域内地区生产总值 976614 万元. 澎溪河流域两岸土壤类型主要有水稻土、紫色土、黄壤土等 6 个土种. 以粮食生产为主, 主要农作物有水稻、小麦、玉米、红薯等. 近年来, 由于三峡大坝的建成、水土流失以及来自工业、农业、生活诸方面的影响, 澎溪河回水区连续出现大面积的藻类聚集上浮现象, 这对该流域航道及城镇的用水安全, 及三峡水库的安全运行造成了极大的影响.

1.2 样品采集和处理

根据澎溪河水文特征, 在澎溪河回水区末端至入江口共设置 6 个采样点位, 分别为渠口、养鹿、渠马、高阳、黄石和双江, 记为 S1、S2、S3、S4、S5、S6, 其中, S1、S2 在回水区末端, S6 是河口, 如图 1 所示. 2015 年 8 月, 分别采集每个点位消落区土壤, 并同时采集紧邻消落区的不被水淹的岸边土壤. 岸边土壤紧邻消落区, 其环境条件与消落区土壤基本相同, 用以对照分析. 用洛阳铲采集表层 15 cm 土壤样品, 置于塑料袋中密封保存, 并于当天运回实验室, -20℃ 条件下冷冻, 经冷冻干燥、研磨过 100 目筛后, 装入封口袋中密封备用.

1.3 分析测定方法

采用 Ruban 等^[9] 在欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分析方法测定土壤总磷(TP)、无机

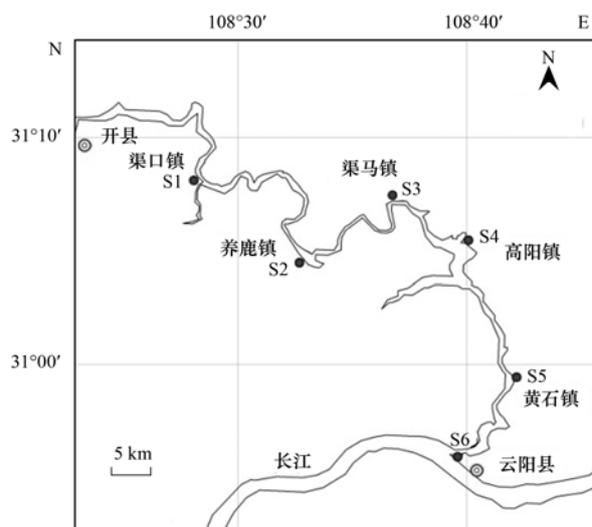


图 1 澎溪河采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Pengxi River

磷(IP)和有机磷(OP). 用 Hedley 连续分级提取法分级提取土壤磷素^[10], 如图 2 所示, 并分别测定弱吸附态磷、潜在活性磷、铁铝结合态磷、钙结合态磷和残渣态磷中的无机磷和有机磷含量. 其中提取液中的总磷(P_i)采用过硫酸钾氧化法消解、磷钼蓝比色法测定, 提取液中的无机磷(P_i)直接采用磷钼蓝比色法测定, 提取液有机磷(P_o)由 P_i 与 P_i 相减得到. 残渣态无机磷 R-P_i 由 IP 减去各提取态 P_i, 残渣态有机磷 R-P_o 由 OP 减去各提取态 P_o 获得.

土壤有机质(organic matter, OM)采用重铬酸钾外加加热法测定, 采用 pH 电极测定土水比为 1:2.5 的 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 土壤悬浮液 pH 作为土壤 pH, 土壤总氮 TN 采用过硫酸钾氧化法测定^[11].

1.4 数据处理

所有样品分析均做 3 次平行, 结果以 3 次样品分析的平均值表示, 误差 < 5%. 数据分析采用 Excel 2010、SPSS 19.0 及 Origin 8.51 软件.

本文中几种磷组分关系表述如下:

土壤 TP(总磷) = IP(无机磷) + OP(有机磷);

提取液中各形态 P_i(总磷) = P_i(无机磷) + P_o(有机磷).

2 结果与分析

2.1 消落区与岸边土壤理化性质

消落区土壤与岸边土壤理化性质与磷素含量见表 1.

由表 1 可知, 研究区域内消落区土壤 pH 值为 7.22 ~ 7.41, 消落区土壤 pH 略高于岸边土壤, 且 6

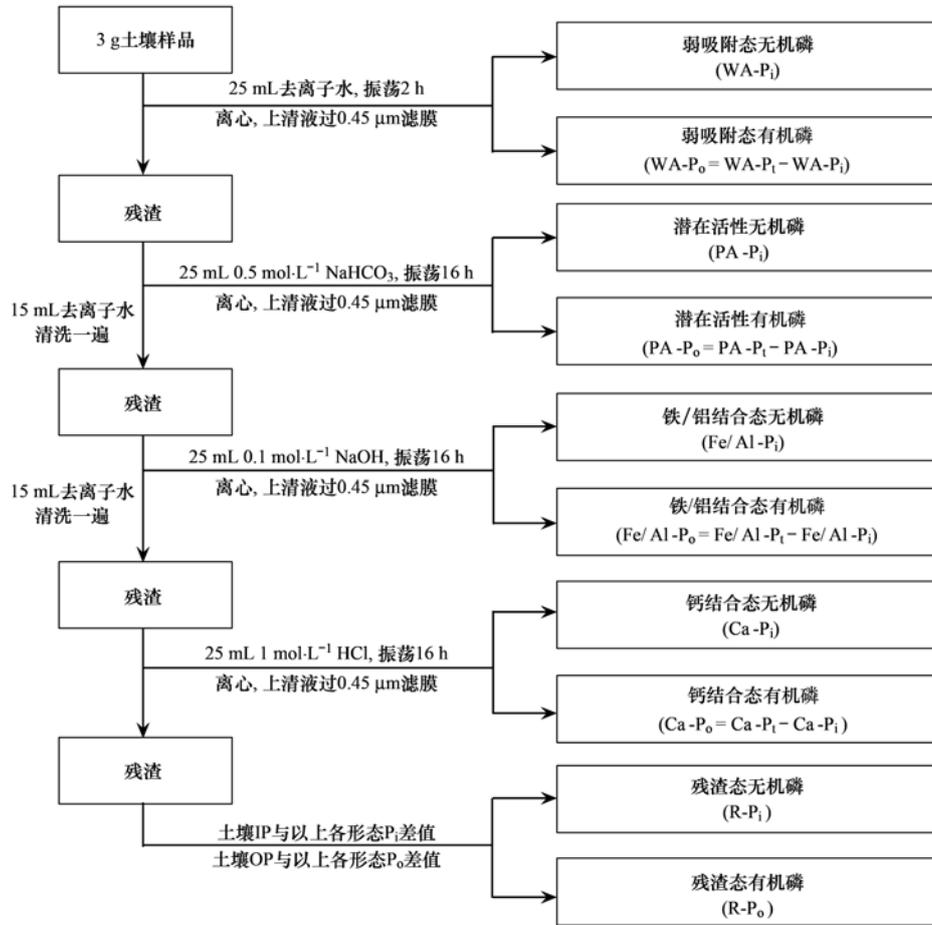


图 2 Hedley 连续分级提取法

Fig. 2 Hedley sequential extraction procedure for phosphorus fractions in soils

表 1 澎溪河流域消落区土壤理化性质与磷素含量

Table 1 Basic characteristics and phosphorus content of soils in the zone of fluctuating water level of Pengxi River

点位	土壤类型	pH	OM /mg·g ⁻¹	TN /mg·g ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	IP /mg·kg ⁻¹	OP /mg·kg ⁻¹
S1	消落区土壤	7.41	15.14	0.64	499.10	326.12	122.77
	岸边土壤	7.34	20.31	1.73	509.86	350.15	143.13
S2	消落区土壤	7.33	14.12	0.89	516.54	386.89	79.17
	岸边土壤	7.30	19.29	1.78	545.85	365.37	111.13
S3	消落区土壤	7.22	22.60	1.01	655.24	503.51	99.68
	岸边土壤	6.60	17.13	1.87	528.72	379.10	116.16
S4	消落区土壤	7.23	12.36	0.97	561.09	496.45	77.85
	岸边土壤	6.31	7.30	0.99	615.74	621.40	51.04
S5	消落区土壤	7.32	6.93	0.76	434.13	297.69	76.66
	岸边土壤	7.35	7.16	1.02	408.87	275.85	90.67
S6	消落区土壤	7.41	8.52	0.78	785.66	641.44	80.50
	岸边土壤	7.40	5.31	0.41	726.21	705.29	34.50

个采样点位消落区土壤 pH 均呈弱碱性,这可能与三峡库区水体 pH 呈碱性有关^[12]。

消落区土壤 OM 含量为 6.93 ~ 22.60 mg·g⁻¹, 均值为 13.28 mg·g⁻¹。岸边土壤 OM 含量为 5.31 ~

20.31 mg·g⁻¹, 均值为 12.75 mg·g⁻¹。整体上澎溪河流域 OM 含量从回水区末端至河口呈递减,在回水区末端,消落区土壤 OM 含量低于岸边土壤,而在靠近河口处,消落区土壤 OM 含量高于岸边土壤。

消落区土壤总氮含量为 $0.64 \sim 1.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $0.84 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 岸边土壤总氮含量为 $0.41 \sim 1.87 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值为 $1.30 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 整体上澎溪河流域各点位间 TN 含量变化不大, 但消落区土壤 TN 含量低于岸边土壤. 张彬等^[13]研究表明, 消落区土壤中可转化态氮(包括离子交换态氮、弱酸可浸取态氮、铁锰氧化态氮、有机硫化物结合态氮)占 TN 46.3%, 该部分氮易迁移至水体中, 成为二次污染源. 这可能是导致消落区土壤 TN 小于岸边土壤的主要原因.

2.2 消落区与岸边土壤磷含量

由表 1 可知, 研究区域内, 消落区土壤总磷(TP)含量为 $434.13 \sim 785.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $575.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值出现在 S6 点位, 最小值出现在 S5 点位. 岸边土壤 TP 含量为 $408.87 \sim 726.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $558.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值和最小值也分别出现在 S6 和 S5 点位. 在回水区末端, 消落区土壤 TP 较永久未淹区低, 而在靠近河口处, 消落区土壤 TP 较高.

土壤中的无机磷(IP)主要是吸附于其上的溶解态磷酸盐以及与水体中部分金属离子结合后以不同形态存在的磷^[14]. 消落区土壤和岸边土壤 IP 含量分别为 $297.69 \sim 641.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $275.85 \sim 705.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值分别为 $442.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $449.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. IP 占 TP 均值分别为 75.96%、78.40%. 这表明样品中的磷以 IP 为主.

土壤中的有机磷(OP)主要由磷酸糖类、磷蛋白、磷脂、磷酸酯和磷酸盐等构成^[15]. Rydin^[16]对瑞典 Erken 湖沉积物磷形态的研究发现, 大约 50% 的 OP 可被降解成为生物可利用的磷形态. 消落区土壤 OP 含量为 $76.66 \sim 122.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $89.44 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 OP 含量为 $34.50 \sim 143.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $91.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 总体上, 消落区土壤 OP 略低于岸边土壤. 有研究表明, 干燥土壤在再湿过程中, 会增加磷的释放, 且释放的磷含量中大部分为有机磷(56%~100%)^[17]. 因此, 三峡库区水位周期性涨落有可能影响消落区土壤 OP.

2.3 消落区与岸边土壤无机磷赋存形态及含量

无机磷是土壤/沉积物中磷素的主要组成部分, 可直接被水生植物吸收和利用^[14]. 由 Hedley 分级提取法, 可将消落区土壤无机磷分为弱吸附态无机磷(WA- P_i)、潜在活性无机磷(PA- P_i)、铁铝结合态无机磷(Fe/Al- P_i)、钙结合态无机磷(Ca- P_i)和残渣态无机磷(R- P_i). 澎溪河 6 个点位各形态无机磷

测定结果如图 3 所示.

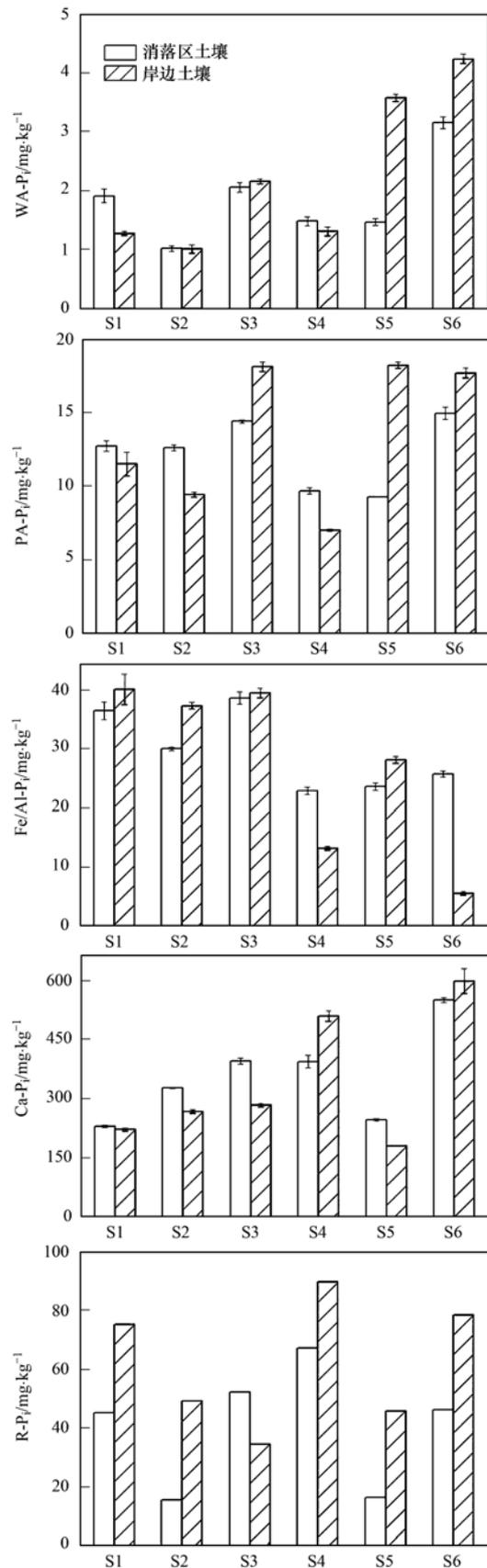


图 3 消落区土壤中无机磷形态与含量

Fig. 3 Fractions and content of inorganic phosphorus in soils

弱吸附态无机磷 $WA-P_i$ 主要来源于间隙水, 或者以物理吸附态附着于碳酸盐、氧化物、氢氧化物或黏土矿粒等其它相上存在的磷, 是极易迁移的磷形态^[18]. 消落区土壤 $WA-P_i$ 含量为 $1.02 \sim 3.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $1.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $WA-P_i$ 含量为 $1.01 \sim 4.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $2.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 总体上, 回水区末端消落区土壤 $WA-P_i$ 含量较河口处低, 且同一采样点位消落区土壤 $WA-P_i$ 含量较岸边低, 在靠近河口的点位尤为明显, 这可能与消落区在库区蓄水期处于浸没, 弱吸附态磷易流失有关^[19].

潜在活性无机磷 $PA-P_i$ 主要指通过 NaHCO_3 溶液提取的部分具有活性的 Fe-P 和 Al-P, 以及一部分活性较高的 Ca-P^[20]. 消落区土壤 $PA-P_i$ 含量为 $9.26 \sim 14.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $12.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $PA-P_i$ 含量在 $7.03 \sim 18.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $13.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

铁铝结合态无机磷 $Fe/Al-P_i$ 指 NaOH 提取的无机磷, 主要包括 Fe/Al 氧化物或氢氧化物结合的磷, 在厌氧环境下可转化为可溶性磷而进入水体再循环, 是内源磷负荷的重要来源^[21]. 消落区土壤 $Fe/Al-P_i$ 含量为 $22.93 \sim 38.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $29.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $Fe/Al-P_i$ 含量为 $5.57 \sim 40.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $27.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 徐德星等^[7] 研究发现, 三峡入库河流大宁河流域沉积物 $Fe/Al-P_i$ 含量较消落区土壤低, 并且认为沉积物的厌氧环境有利于 $Fe/Al-P_i$ 释放.

钙结合态无机磷 $Ca-P_i$ 主要指与自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等含磷矿物有关的沉积磷存在形态^[22]. 消落区土壤 $Ca-P_i$ 含量为 $229.76 \sim 551.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $357.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $Ca-P_i$ 含量在 $180.05 \sim 599.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $344.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 整体上, 消落区土壤 $Ca-P_i$ 含量高于岸边土壤, 这可能与消落区土壤 pH 较永久未淹区土壤高有关, 较高的 pH 环境不利于 $Ca-P_i$ 从土壤向水体释放. 研究区域内, $Ca-P_i$ 是土壤磷素的主要组成部分, 消落区土壤 $Ca-P_i$ 占 TP 的 $46.04\% \sim 70.17\%$, 均值为 61.23% , 岸边土壤 $Ca-P_i$ 占 TP 的 $43.55\% \sim 82.52\%$, 均值为 59.00% .

残渣态无机磷 $R-P_i$ 可永久地与矿物结合, 是一种非生物有效磷^[22]. 本研究发现残渣态磷中含有大部分的无机磷 ($R-P_i$), 消落区土壤 $R-P_i$ 含量较永久未淹区土壤低. 消落区土壤和岸边土壤 $R-P_i$ 含

量分别为 $40.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $62.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占残渣态磷分别为 25.71% 、 52.74% . 这与王雯雯等^[23] 和王书航等^[24] 认为沉积物中残渣态磷主要为不可提取有机磷不同.

研究区域内, 土壤连续分级提取的各形态无机磷含量差异显著, 总体上消落区土壤和岸边土壤均表现为 $Ca-P_i > R-P_i > Fe/Al-P_i > PA-P_i > WA-P_i$. 消落区土壤与岸边土壤中 $WA-P_i$ 、 $PA-P_i$ 、 $Fe/Al-P_i$ 这 3 种易迁移的无机磷形态之和分别占可提取 P_i 的 11.61% 、 13.63% .

2.4 消落区与岸边土壤有机磷赋存形态及含量

有机磷在土壤中可以通过细菌降解、磷酸酶水解或光解转化为无机磷^[15, 25]. 由 Hedley 分级提取法, 可将消落区土壤有机磷分为弱吸附态有机磷 ($WA-P_o$)、潜在活性有机磷 ($PA-P_o$)、铁铝结合态有机磷 ($Fe/Al-P_o$)、钙结合态有机磷 ($Ca-P_o$) 和残渣态有机磷 ($R-P_o$). 澎溪河 6 个点位各形态有机磷测定结果如图 4 所示.

弱吸附态有机磷 $WA-P_o$ 的来源与 $WA-P_i$ 相似, 也是极易矿化和迁移的磷形态^[26]. 消落区土壤 $WA-P_o$ 含量为 $0.58 \sim 1.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $WA-P_o$ 含量为 $0.40 \sim 1.90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $1.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

潜在活性有机磷 $PA-P_o$ 主要指 NaHCO_3 溶液提取的核酸、磷脂类、磷糖类等含磷化合物, 是土壤、沉积物中较为“活跃”的磷形态, 容易被分解为小分子化合物或磷酸盐进而释放到间隙水中^[3, 27]. 消落区土壤 $PA-P_o$ 含量为 $1.92 \sim 3.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $2.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $PA-P_o$ 含量为 $1.75 \sim 4.62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $3.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

铁铝结合态有机磷 $Fe/Al-P_o$ 主要包含富里酸结合态有机磷和胡敏酸结合态有机磷, 前者为中活性有机磷, 后者为非活性有机磷^[3]. Zhu 等^[15] 对滇池沉积物的研究发现, 大约有 70% $Fe/Al-P_o$ 可以被酶解成无机磷而被水生生物利用. 消落区土壤 $Fe/Al-P_o$ 含量为 $6.54 \sim 19.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $11.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 $Fe/Al-P_o$ 含量为 $6.34 \sim 32.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $16.08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 研究区域内, $Fe/Al-P_o$ 是可提取有机磷的主要组成部分, 其中消落区土壤 $Fe/Al-P_o$ 占可提取 P_o 的 66.30% , 在淹水状态释放的磷含量不能被忽视.

钙结合态有机磷 $Ca-P_o$ 主要是与钙、镁结合的有机磷, 属于中活性有机磷^[23]. 消落区土壤 $Ca-P_o$

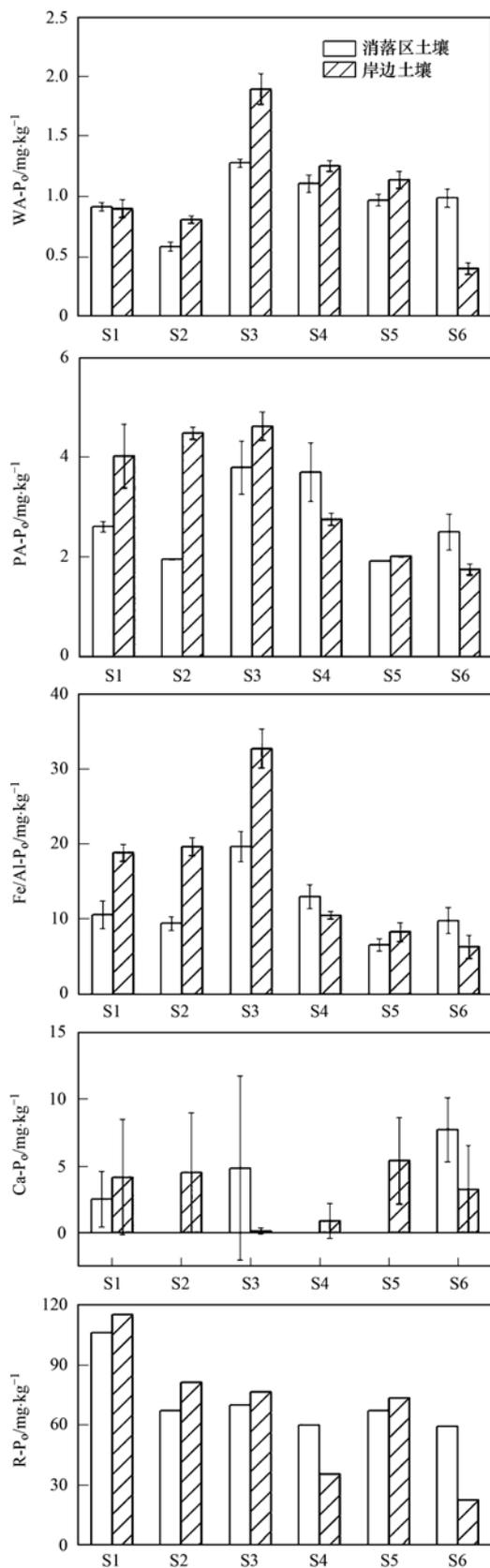


图4 土壤中有有机磷形态与含量

Fig. 4 Fractions and content of organic phosphorus in soils

含量为 $0 \sim 7.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 岸

边土壤 Ca-P_o 含量在 $0.15 \sim 4.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $3.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 对比图3可知, Ca-P_i 含量很高, 而 Ca-P_o 含量较低, 导致 Ca-P_o 测量误差较大, 且各点位之间差异也较大.

残渣态有机磷 R-P_o 主要成分为植酸态磷, 是最不易被矿化和降解的非活性有机磷^[28]. 消落区土壤 R-P_o 含量为 $59.44 \sim 106.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $71.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 岸边土壤 R-P_o 含量为 $22.70 \sim 115.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $67.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在回水区末端, 消落区土壤 R-P_o 含量较岸边土壤低, 但在河口处, 消落区土壤 R-P_o 含量较岸边土壤高.

研究区域内, 土壤连续分级提取的各形态有机磷含量差异大, 但消落区土壤各形态有机磷均值含量均小于岸边土壤, 且均表现为 $\text{R-P}_o > \text{Fe/Al-P}_o > \text{Ca-P}_o > \text{PA-P}_o > \text{WA-P}_o$. 消落区土壤 WA-P_o 、 PA-P_o 两种生物可利用性较高的有机磷形态之和占可提取 P_o 的 22.28% , Fe/Al-P_o 占土壤可提取 P_o 的 66.30% , 是可提取 P_o 的主要组成部分.

3 讨论

3.1 三峡库区水位周期性涨落对土壤磷形态的影响

研究区域内, 消落区土壤和岸边土壤的 IP 及各形态 P_i 含量之间差异不显著, 但是消落区土壤 WA-P_i 、 PA-P_i 、 Fe/Al-P_i 这3种迁移性较高的无机磷形态占可提取 P_i 质量分数较岸边土壤低, 消落区为 11.61% , 岸边土壤为 13.63% . 何立平等^[29]对三峡消落区土壤的研究表明, WA-P_i 、 PA-P_i 、 Fe/Al-P_i 是库区藻类易于利用的磷形态, 亦是消落区土壤中容易流失的磷形态. 张雷等^[19]对三峡消落区土壤的研究表明, 消落区土壤中, 以 MgCl_2 作为提取剂提取的吸附态磷占无机磷的比例平均为 4.1% , 在岸边土壤中则升高至 7.3% , 并且大多数岸边土壤的吸附态磷含量大于消落区, 这与消落区在蓄水期被浸没, 吸附态磷易流失有关. 可见三峡库区水位周期性涨落会影响消落区土壤易迁移的 P_i 含量.

澎溪河流域消落区土壤 OP 含量总体上低于岸边土壤 OP 含量, 如图5所示. 消落区土壤 OP 含量为 $91.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 岸边土壤 OP 含量为 $102.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 张雷等^[19]对三峡消落区土壤和岸边土壤的研究也发现, 大多数点位消落区土壤 OP 含量低于岸边土壤 OP 含量, 有的点位消落区土壤 OP 含量只有岸边土壤的一半, 这与本研究结果相近. 造成这种结果的原因可能是消落区土壤中 OP 释放到了水体中. 在本研究中岸边土壤紧邻消落区, 其环境

条件与消落区土壤基本相同. 但是相比于岸边土壤, 消落区土壤经历了周期性的落干-淹没, 消落区土壤生物、物理和化学性质均发生显著改变, 这将对土壤有机磷形态及含量产生影响. 消落区土壤干燥再湿过程中, 大部分微生物细胞因渗透压的突然改变, 导致细胞破裂溶解释放磷素, 所释放的磷大部分为有机磷^[17, 30], 因而导致消落区土壤有机磷含量降低. 此外, 消落区土壤中留有大量植物残体, 周期性干湿交替导致土壤水分条件的变化, 将影响植物残体矿化分解, 产生有机酸而促进土壤有机磷的溶解和活化^[31]. 另一方面, 消落区土壤淹没时处于厌氧状态, 氧含量和氧化还原电位较低, 使得 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} , 不溶性的三价铁有机磷化合物转化为可溶性有机磷, 使土壤中有机磷含量降低^[6]. 因此, 三峡库区水体周期性涨落是导致消落区土壤 OP 含量低于岸边土壤 OP 含量的主要原因.

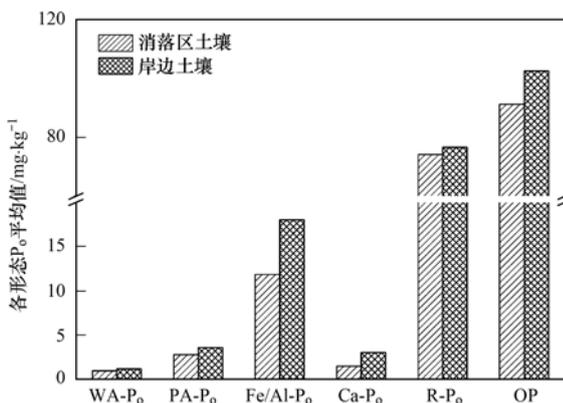


图5 OP及各形态P_o含量均值对比

Fig. 5 Comparison of different organic phosphorus forms and OP in soils

进一步对比各形态P_o含量发现, 消落区土壤中WA-P_o、PA-P_o、Fe/Al-P_o、Ca-P_o、R-P_o等5种有机

磷形态均低于岸边土壤, 如图5所示. WA-P_o、PA-P_o为活性有机磷, 生物可利用性较好, 可作为浮游植物和水生生物生长的一种有效磷源^[3, 26]; Ca-P_o为中活性有机磷^[23], Fe/Al-P_o的大部分为中活性有机磷^[3], 这些有机磷稳定性较差, 易受环境变化而释放至水体中^[32]. 值得注意的是, 由图5可看出, 消落区土壤和岸边土壤各形态P_o之中, Fe/Al-P_o含量差异最大, 消落区土壤中Fe/Al-P_o含量为11.86 mg·kg⁻¹, 岸边土壤中Fe/Al-P_o含量为18.03 mg·kg⁻¹, 这是造成消落区土壤OP含量低于岸边土壤OP含量的主要原因. 因此, 淹水期消落区土壤长时间处于厌氧环境, 是影响消落区土壤OP含量的主要环境因素. 此外, 消落区土壤中Fe/Al-P_o占土壤可提取P_o的66.30%, 是可提取P_o的主要组成部分, 因此, 在淹水期, 消落区土壤Fe/Al-P_o的释放对上覆水体的影响不容忽视.

3.2 相关性分析

分析土壤中各形态磷之间的相关关系, 有利于认识磷形态的分布特征. 表2给出了消落区土壤各形态磷含量之间的相关性分析结果. 消落区土壤TP和IP含量与Ca-P_i呈极显著相关, 且Ca-P_i占TP的60.50%, 说明消落带土壤中TP、IP含量的增加主要来自Ca-P_i, 可能与流域范围内的土壤及矿物中较高的Ca含量有关^[7]. 而TP与活性较强的WA-P_i、PA-P_i相关性显著, 说明消落区土壤中活性磷的含量主要受TP的影响, 消落区土壤TP越高, 其活性磷的含量可能也越高. OP与R-P_i具有显著相关, 这是由于R-P_i是OP的主要组成部分. 此外, 消落区土壤各形态磷之间不具有显著相关性, 表明其含量相互独立, 可能是不同形态磷来源不同所致.

表2 消落区土壤磷形态含量相关性分析

Table 2 Correlation analysis between phosphorus forms in water-level-fluctuating zone soils

	WA-P _i	PA-P _i	Fe/Al-P _i	Ca-P _i	R-P _i	TP	IP	OP
WA-P _i	1							
PA-P _i	0.651	1						
Fe/Al-P _i	0.208	0.718	1					
Ca-P _i	0.713	0.620	-0.013	1				
R-P _i	0.458	0.564	0.615	-0.113	1			
TP	0.822*	0.812*	0.230	0.953**	0.183	1		
IP	0.725	0.675	0.101	0.985**	-0.075	0.959**	1	
OP	0.167	0.393	0.688	-0.375	0.877*	-0.092	-0.275	1

1) $n=6$; *表示显著相关 $P<0.05$, **表示极显著相关 $P<0.01$

土壤中磷形态与土壤理化性质之间的关系可以用来推断土壤中磷的特性^[33]. 分析了消落区土壤5

种磷形态与TN、pH、OM、含水率、电导率、温度等土壤理化性质之间的相关性发现, 消落区土壤Fe/

Al-P_i 含量与土壤有机质 OM 呈显著的正相关 ($r = 0.962$, $P < 0.01$, $n = 6$), 表明土壤有机质的含量可能影响铁铝结合态磷含量. 土壤理化性质中, 土壤含水率、电导率和温度是采集土壤时现场测定的指标, 与各磷形态没有显著相关性, 可能是由于这些指标易受采样当时的气候条件所影响. 另外, 徐德星等^[7]和张彬等^[34]发现, 消落区土壤中 OM 与 OP、TN 与 OP、TN 与 Fe/Al-P 之间有显著相关性, 并且认为 OM 和 TN 的输入在一定程度上影响了磷形态的分布. 但是本研究并没有发现类似的规律, 这可能与采样点位不多以及消落区土壤易受人为主因素的影响有关.

4 结论

(1) 消落区土壤 TP 含量为 434.13 ~ 785.66 mg·kg⁻¹, 岸边土壤 TP 含量为 408.87 ~ 726.21 mg·kg⁻¹. 消落区、岸边土壤中 OP 含量均值分别为 91.23 mg·kg⁻¹、102.43 mg·kg⁻¹, 占总磷的质量分数分别为 16.15% 和 17.57%, 消落区土壤 OP 含量低于岸边土壤.

(2) 消落区土壤和岸边土壤各形态无机磷均表现为 Ca-P_i > R-P_i > Fe/Al-P_i > PA-P_i > WA-P_i, 消落区土壤 WA-P_i、PA-P_i、Fe/Al-P_i 这 3 种易迁移的无机磷形态之和占可提取 P_i 的 11.61%, 且低于岸边土壤. 各形态有机磷均表现为 R-P_o > Fe/Al-P_o > Ca-P_o > PA-P_o > WA-P_o, 消落区土壤中, WA-P_o、PA-P_o 两种生物可利用性较高的有机磷形态之和占可提取 P_o 的 22.28%, 中活性有机磷 Fe/Al-P_o 是可提取 P_o 的主要组成部分, 占可提取 P_o 的 66.30%. 在各形态 P_o 方面, 消落区土壤均小于岸边土壤, 其中, Fe/Al-P_o 含量差异最大, 这是造成消落区土壤 OP 含量低于岸边土壤 OP 含量的主要原因.

(3) 消落区土壤 TP 与活性较强的 WA-P_i、PA-P_i 相关性显著, 表明消落区土壤活性磷含量主要受 TP 影响. 各形态磷之间不具有显著相关性, 表明不同形态磷的来源可能不同. 消落区土壤 Fe/Al-P_i 与土壤有机质 OM 呈显著相关, 表明土壤有机质的含量可能影响铁铝结合态磷含量.

参考文献:

- [1] Chen S Y, Chen Y Y, Liu J Z, *et al.* Vertical variation of phosphorus forms in core sediments from Dongping lake, China [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **10**: 1797-1801.
- [2] Ni Z K, Wang S R, Zhang L, *et al.* Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(13): 10116-10129.
- [3] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 366-372.
- [4] Aldous A, McCormick P, Ferguson C, *et al.* Hydrologic regime controls soil phosphorus fluxes in restoration and undisturbed wetlands [J]. *Restoration Ecology*, 2005, **13**(2): 341-347.
- [5] Baldwin D S. Effects of exposure to air and subsequent drying on the phosphate sorption characteristics of sediments from a eutrophic reservoir [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(8): 1725-1732.
- [6] 吉芳英, 曹琳, 林茂, 等. 三峡库区新生消落区沉积物磷形态分析 [J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(8): 882-886.
Ji F Y, Cao L, Lin M, *et al.* Phosphorus forms analysis in sediments of the newly emerged fluctuation zone in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(8): 882-886.
- [7] 徐德星, 秦延文, 张雷, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1337-1344.
Xu D X, Qin Y W, Zhang L, *et al.* Phosphorus forms and its distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1337-1344.
- [8] 张彬. 三峡水库消落带土壤有机质、氮、磷分布特征及通量研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013. 10-12.
Zhang B. Study on distribution characteristics and flux of organic matter, nitrogen and phosphorus in the soil of WLFZ of Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. 10-12.
- [9] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 51-56.
- [10] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [12] 王图锦, 杨清伟, 刘雪莲. 三峡库区 172m 蓄水位实现后干流水体溶解态重金属含量变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(9): 1195-1200.
Wang T J, Yang Q W, Liu X L. Distribution of soluble heavy metal concentration in the water body in Three Gorges Reservoir after its 172 m impoundment [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(9): 1195-1200.
- [13] 张彬, 陈猷鹏, 方芳, 等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(5): 1126-1133.
Zhang B, Chen Y P, Fang F, *et al.* Nitrogen forms and their distribution characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(5): 1126-1133.

- [14] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(1): 43-47.
Pan C R, Wang J Q, Zheng Z X, *et al.* Forms of phosphorus and nitrogen existing in sediments in Chaohu Lake[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, **23**(1): 43-47.
- [15] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, *et al.* Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(14): 7679-7687.
- [16] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [17] Turner B L, Haygarth P M. Biogeochemistry: phosphorus solubilization in rewetted soils[J]. Nature, 2001, **411**(6835): 258.
- [18] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 291-295.
- [19] 张雷, 秦延文, 贾静, 等. 三峡入库河流澎溪河回水区消落带与岸边土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1999-2007.
Zhang L, Qin Y W, Jia J, *et al.* Phosphorus forms and its distribution characteristics in soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach of the Pengxi River, input river of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(9): 1999-2007.
- [20] Fabre A, Qotbi A, Dauta A, *et al.* Relation between algal available phosphate in the sediments of the River Garonne and chemically-determined phosphate fractions [J]. Hydrobiologia, 1996, **335**(1): 43-48.
- [21] Ruban V, Brigault S, Demare D, *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**(4): 403-407.
- [22] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. Chemosphere, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [23] 王雯雯, 王书航, 赵丽, 等. 丹江口水库表层沉积物有机/无机磷形态特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 808-818.
Wang W W, Wang S H, Zhao L, *et al.* Identification of inorganic and organic species of phosphorus and its bio-availability by aequential extraction method in surface sediments of Danjiangkou Reservoir [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 808-818.
- [24] 王书航, 张博, 姜霞, 等. 采用连续分级提取法研究沉积物中磷的化学形态[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(9): 1382-1388.
Wang S H, Zhang B, Jiang X, *et al.* Analysis of phosphorus fractions in sediments by sequential extraction[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(9): 1382-1388.
- [25] He Z Q, Olk D C, Honeycutt C W, *et al.* Enzymatically and ultraviolet-labile phosphorus in humic acid fractions from rice soils[J]. Soil Science, 2009, **174**(2): 81-87.
- [26] He Z Q, Griffin T S, Honeycutt C W. Evaluation of soil phosphorus transformations by sequential fractionation and phosphatase hydrolysis[J]. Soil Science, 2004, **169**(7): 515-527.
- [27] Liu Q, Liu S L, Zhao H D, *et al.* The phosphorus speciations in the sediments up-and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River [J]. Chemosphere, 2015, **120**: 653-659.
- [28] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978, **125**(2): 95-101.
- [29] 何立平, 付川, 谢昆, 等. 三峡库区万州段不同类型消落带土壤磷形态贮存特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(4): 534-541.
He L P, Fu C, Xie K, *et al.* Soil phosphorus species and storage characteristics of different types in water fluctuation zone of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(4): 534-541.
- [30] Turner B L, Driessen J P, Haygarth P M, *et al.* Potential contribution of lysed bacterial cells to phosphorus solubilisation in two rewetted Australian pasture soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(1): 187-189.
- [31] 彭娜, 王凯荣, Buresh R J, 等. 不同水分条件下施用稻草对土壤有机酸和有效磷的影响[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 347-351.
Peng N, Wang K R, Buresh R J, *et al.* Effect of rice straw incorporation on concentration of organic acids and available phosphorus in soil under different water regimes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, **43**(2): 347-351.
- [32] 马双丽, 倪兆奎, 王圣瑞, 等. 鄱阳湖沉积物有机磷形态及对水位变化响应[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3607-3614.
Ma S L, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Organic phosphorus forms in sediments and their relationship with the change of water level in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3607-3614.
- [33] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in french coastal areas [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **52**(5): 617-629.
- [34] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 713-720.
Zhang B, Fang F, Chen Y P, *et al.* Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(3): 713-720.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)