DOI: 10.20103/j.stxb.202306161294

王馨平,吕明权,文雯,马琦.重庆丘陵山区池塘沉积物有机碳埋藏速率及其影响因素.生态学报,2023,43(24):10216-10227. Wang X P, Lü M Q, Wen W, Ma Q.Organic carbon burial rate and its influencing factors in pond sediments in hilly and mountainous area of Chongqing. Acta Ecologica Sinica,2023,43(24):10216-10227.

重庆丘陵山区池塘沉积物有机碳埋藏速率及其影响 因素

王馨平^{1,2,3},吕明权^{2,*},文 雯²,马 琦^{1,2,3}

1 重庆交通大学,重庆 400074
2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 400714

3 中国科学院大学重庆学院,重庆 400714

摘要:池塘等小型水体在全球碳循环中发挥着重要作用,是碳排放的热区,但是对池塘碳埋藏速率认识相对匮乏,限制了全面认识池塘在流域碳传输中的功能。为探究池塘沉积物有机碳埋藏速率及其影响因素,选取重庆市北碚区柳荫镇的11个池塘为研究对象,于2022年7月对池塘沉积物进行采样,分析了池塘沉积物基本理化性质,估算出池塘沉积物有机碳埋藏速和埋藏速率,并分析了池塘因素和流域因素对池塘沉积物有机碳埋藏速率的影响。结果显示:(1)沉积物总有机碳(TOC, Total Organic Carbon)含量在1.03%—3.51%之间变化,总体呈现随深度增加而逐渐降低的趋势;(2)有机碳埋藏速率均值为194.60gm⁻²a⁻¹,范围区间为142.76—293.32gm⁻²a⁻¹,略高于其他池塘的类似研究结果;(3)沉积物 TOC含量与总氮(TN, Total Nitrogen)含量呈显著正相关(P<0.01),与流域中林地面积占比呈显著正相关(P<0.05),与旱地面积占比呈显著负相关(P<0.05),而有机碳埋藏速率与流域内旱地面积占比呈显著正相关(P<0.05)。研究结果表明,池塘相对于大型水体储碳能力更强,池塘虽然单位面积小,但数量多,在生态系统的碳收支核算中是一种不可忽视的地理景观单元。 关键词:池塘;沉积物;总有机碳;碳汇;有机碳埋藏速率

Organic carbon burial rate and its influencing factors in pond sediments in hilly and mountainous area of Chongqing

WANG Xinping^{1,2,3}, LÜ Mingquan^{2,*}, WEN Wen², MA Qi^{1,2,3}

1 Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2 Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

3 Chongqing School, University of Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

Abstract: Small water bodies, such as ponds, play an important role in the global carbon cycle and serve as the significant sources of carbon emissions. However, our understanding of the carbon burial rate in ponds remains incomplete, limiting our comprehensive grasp of their contribution to carbon transport within river basins. Despite their small individual size, the collective number of ponds made them an important part of the carbon budget in ecosystems. In order to explore the burial rate of organic carbon in pond sediments and its influencing factors, this study focused on 11 ponds in Liuyin Town, Beibei District, Chongqing. We analyzed the basic physicochemical properties of the sediment in these ponds by collecting samples in July 2022. It helped us estimate the quantity of organic carbon and its burial rate in the sediments. Additionally, the study analyzed the impact of pond and basin factors on the organic carbon burial rate in pond sediments. We found that:

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A)(XDA23040303);国家自然科学基金项目(42071242);中央引导地方科技发展专项资金项目 (2021000069)

收稿日期:2023-06-16; 网络出版日期:2023-11-10

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lvmingquan@ cigit.ac.cn

http://www.ecologica.cn

(1) The water content of pond sediment gradually decreases from top to bottom with depth, while the dry bulk density shows a trend of first increasing and then decreasing. The content of total organic carbon (TOC) varied from 1.03% to 3.51%, exhibiting a gradual decline with the increasing depth. (2) The average rate of organic carbon burial was 194.60 g m⁻² a⁻¹, and the range was 142.76—293.32 g m⁻² a⁻¹. The result is one order of magnitude higher than domestic lakes and slightly higher than similar studies of other ponds. By comparing the carbon emission of ponds in the same climate region, it is found that the carbon deposition of ponds is 0.73 to 1.5 times of the total carbon emission. (3) TOC in sediment was positively correlated with total nitrogen (TN) (P<0.01), and positively correlated with the proportion of forest area in the basin (P<0.05). While negatively correlated with the proportion of dryland area in the basin (P<0.05). The results showed that compared with large water bodies, ponds had stronger carbon storage capacity. Ponds were both carbon sources and sinks, and the organic carbon deposition of pond sediments was affected by human cultivation activities in the basin. This study helps to quantify the carbon sequestration capacity of small water bodies such as ponds, in order to provide a reference for estimating the contribution of small water bodies to the regional and global carbon cycle.

Key Words: pond; sediments; total organic carbon; carbon sink; organic carbon burial rate

内陆水体是陆地—海洋生态系统碳循环的连接通道^[1]。近年来,内陆水体在碳循环中的功能被重新认 识,由最初的碳输移"管道"改变为"转换器",即内陆水体可以输移、排放、沉积从陆地生态系统进入的碳^[2]。 因此,精确量化内陆水体的碳输移、排放和沉积可以更全面地认识全球碳循环过程^[3]。目前,不同类型内陆 水体碳排放是研究热点,碳输移和沉积研究相对匮乏,特别是内陆水体碳沉积研究,因取样观测难度较大,内 陆水体的碳沉积估算不确定性非常大,其有机碳沉积通量介于 0.2—1.6 Pg C/a^[2,4—9],因此,非常有必要精确 量化内陆水体的碳沉积通量。目前,关于大型水体如湖泊和水库的碳埋藏通量研究较多^[10—18],Mendonça^[19] 等估计了全球湖泊水库的碳埋藏通量是 0.15 Pg C/a,相比大型水体,池塘一类的小型水体在有机碳沉积作用 方面的研究较为匮乏。

池塘在碳循环的作用逐渐被学术界认识。相关研究发现,池塘等小型水体比同面积的大型水体碳排放通 量更大,例如 Holgerson 和 Raymond^[20]的研究表明,非常小的池塘仅占全球湖泊和池塘面积的 8.6%,但分别占 CO_2 、 CH_4 排放量的 15.1%和 40.6%,这些研究说明池塘是碳排放热区。然而,池塘在碳循环中的沉积作用也 非常大,Downing^[21]等对美国爱荷华州 40 个小型农业池塘的研究结果表明,富营养化的农业池塘有机碳埋藏 速率很高,达到 2122 g m⁻² a⁻¹,比自然湖泊或大型水库的有机碳埋藏速率高一到两个数量级,这主要归因于 农业池塘流域的高泥沙输入率和高营养浓度对沉积物有机质保存的积极作用。基于此有机碳埋藏速率, Downing 等人推测全球池塘的有机碳埋藏量比海洋还大。Taylor^[21]等对英国三组不同植物演替过程的池塘进 行研究,结果表明三组池塘之间有机碳埋藏量差异显著,有机碳埋藏速率均值为 142 g m⁻² a⁻¹,虽比 Downing^[21]的估算值小,但超过了森林、草原等陆地生态系统有机碳埋藏速率,是有机碳埋藏的热区。另有一 部分学者重点研究用于调蓄雨水的城市池塘,结果表明,相较于农业池塘,城市池塘有机碳埋藏速率较小,在 29.2—135.2 g m⁻² a⁻¹之间^[23–25]。Moore 等^[23]研究了美国北卡罗来纳州 20 个城市池塘和 20 个人工湿地,发 现人工湿地的有机碳埋藏速率(84.4 g m⁻² a⁻¹)略大于城市池塘(81.3 g m⁻² a⁻¹)。池塘因面积小,易受到植 被、气候等环境条件的影响,其有机碳埋藏空间差异更大^[26]。目前,池塘是碳排放和沉积的热区,为了全面认 识池塘的功能,即碳沉积和排放的相对强弱,应尽可能多地对不同地区不同类型的池塘进行有机碳埋藏速率 估算和比较分析。

中国地形复杂、地域辽阔,受到大陆季风性气候的影响,降雨不均匀、水资源时空分布不平衡,农村地区为满足农业灌溉和生活用水等日常需求修建大量池塘等小型水体。据最新估计^[27],中国小型水体(<0.1 km²的池塘和小水库)数量达到了510.8 万个,占水体总量的98.65%,由于其个体面积小,其总面积仅占所有水体面

积的 17.85%,长江流域的小型水体数量最多,为 308.27 万个。如果按面积小于 0.01 km²的水体为池塘,中国 这类池塘数量超过了 435 万个,是不可忽视的水体景观要素,与已有池塘数据的英国、美国、日本及澳大利亚 相比,中国拥有池塘数量最多,面积最大。目前关于池塘的碳排放的研究较多^[28-33],而有机碳沉积的研究还 非常缺乏,限制了我们全面认识池塘在碳循环中的重要作用。本研究选择重庆市北碚区柳荫镇的 11 个丘陵 山区池塘进行研究,以获取池塘沉积物淤积深度、有机碳含量等信息,并基于高精度的遥感影像获取了池塘面 积、汇水流域、流域内土地利用情况等信息,估算了池塘沉积物有机碳埋藏速率和埋藏量,最后对池塘有机碳 埋藏速率的影响因素进行分析。本研究有助于量化池塘等小型水体的碳收支能力,以期为估算小型水体对区 域和全球碳循环的贡献提供理论参考和数据支撑。

1 研究区概况

20世纪五六十年代,重庆市建造大量山坪塘以满足丘陵山区的人畜饮水和农业灌溉需求,使得重庆丘陵山区池塘分布广、密度大。因此,选取重庆市北碚区柳荫镇的池塘开展研究,地理坐标为东经 106.59°— 106.63°,北纬 29.94°—29.96°,属亚热带季风湿润气候。研究区常年降雨,年平均降雨量为 1200 mm,主要集中在 5月—12月,年平均气温为 16—23℃,年平均湿度为 70%—80%,地势西高东低,以山地丘陵地形为主。研究区地理位置见图 1,在研究区内共选取 11 个池塘进行采样,所选池塘位置分散,大小不一。池塘常年蓄水,平均水深为 1.68 m,淤泥深度在 0.40—1.86 m 之间,面积在 0.06 hm²到 1.02 hm²之间。池塘周边有林地、农业用地及居民住宅,没有小作坊、工厂等,农业用地主要分为旱地和水田两种,旱地为玉米红薯间作,水田则用以种植水稻,无规模化种植。池塘除藻类繁殖外,无其他水生植物生长。



图 1 研究区地理位置及池塘位置分布 Fig.1 Geographical location of the research area and pond location distribution

2 研究方法

2.1 样品的采集及测定

2022年7月,对研究区池塘进行实地考察,走访多名附近居民,并从当地水利局查询山坪塘建设资料,从 而确定池塘建造年份及最近一次清淤时间。我们将距离最近一次池塘疏浚的时长定为有效池塘年龄,未疏浚 池塘自池塘建造年份算起。后续用于计算、分析的池塘年龄均指有效池塘年龄。为了得到池塘中心的沉积物 淤积深度,我们采用直径 8 mm 的钢筋从池塘中心垂直打入。触碰底泥表面时做第一次标记,直至打到池塘 硬底无法打入时做第二次标记,最后抽出钢筋,测量出水深和池塘中心的沉积物淤积深度。利用 HP-55 杆持 式柱状沉积物采样器对研究区 11 个池塘进行采样。在每个池塘中心采集未受扰动的 40—80 cm 沉积物柱芯 样品,现场按照 10 cm 间隔分割,从沉积柱底层往上依次装袋标记。切割好的样品运回实验室后,进行自然风 干,研磨后过 100 目筛,存储待测。沉积物 TOC (总有机碳,Total Organic Carbon)、TN (总氮,Total Nitrogen) 含量使用总有机碳分析仪(multi N/C 3100)、元素分析仪(vario EL cube)进行测定。

2.2 池塘流域土地利用提取

基于空间分辨率 5 m 的柳荫镇 DEM 数据,利用 AreGIS 10.5 中水文分析模块,提取所取样的 11 个池塘的 汇水流域边界。本研究依托高精度的遥感影像与目视解译的方法,结合研究区近十年来实际情况,将研究区 土地利用划分为水田、旱地、水塘、建筑用地、林地五个类型,形成土地利用分类图,池塘流域土地利用类型面 积比例见图 2。其中,11 号池塘流域面积最小,为 0.42 hm²,1 号池塘流域面积最大,为 63.32 hm²。在研究区 内,所有池塘流域土地利用类型中,林地和旱地占比最大,在 10、11 号池塘流域中,旱地占比均超过了 50%,而 8 号池塘流域内没有旱地,林地占比达 95%。所有池塘的流域中,水田和水塘占比均低于 20%,9 号池塘流域 中水田占比最多,为 14%。





2.3 有机碳埋藏速率估算方法

通过实地调查和遥感影像,已知池塘水面面积、水深及沉积物淤积深度,并根据相关资料,确定池塘边坡 坡度为1:1.5。通过样品分析,得到每层沉积物柱芯的 TOC 含量、容重,但由于受到取样条件的限制,我们未 能获取到全部淤积深度的沉积物柱芯,因此在下面的估算中,假设未采集到的底部沉积物的 TOC 含量、容重 同柱芯最底层样品一致。

在估算有机碳埋藏速率前,采用锥台法^[34]对沉积物淤积量进行计算,即将每层沉积物看作单独的圆锥台,采用圆锥台体积计算公式计算出每层的沉积物淤积量,计算公式如下:

$$V_i = \frac{1}{3}\pi h_i (r_{i-1}^2 + r_i^2 + r_{i-1} \times r_i)$$
(1)

式中, V_i 为第 *i* 层锥台体积,即沉积物淤积量(m³); h_i 为第 *i* 层锥台的高,即沉积物每层深度(m); r_{i-1} 为第 *i*

层锥台下台半径,即第*i*-1层锥台上台半径(m);r_i为第*i*层锥台上台半径(m)。

锥台法示意图如图 3 所示:

接着,由各层沉积物 TOC 含量和容重相乘得到每 层沉积物柱芯的有机碳密度,将每层沉积物淤积量与有 机碳密度相乘并求和,除以池塘水面面积得到沉积物有 机碳埋藏量(OCA,g/m²),最后由有机碳埋藏量除以有 效池塘年龄得到有机碳埋藏速率(OCAR,g m⁻² a⁻¹), 计算公式如下:

沉积物有机碳密度,

$$W_i = C_i \times \rho_i \tag{2}$$

池塘沉积物有机碳埋藏量,

$$OCA = \frac{\sum_{i=1}^{n} (W_i \times V_i \times 1000)}{S}$$

池塘沉积物有机碳埋藏速率,



图 3 维台法示意图 Fig.3 Schematic diagram of circular table method

 r_{i-1} :第*i* 层锥台下台半径,即第*i*-1 层锥台上台半径(m); r_i :第*i* 层锥台上台半径(m); h_i :第*i* 层锥台的高,即沉积物每层深度(m)

$$OCAR = \frac{\sum_{i=1}^{n} (W_i \times V_i \times 1000)}{S \times t}$$
(4)

式中, W_i 为第*i* 层有机碳密度(mg/cm³); C_i 为第*i* 层沉积物样品 TOC 含量(g/kg); ρ_i 为第*i* 层沉积物样品容重 (g/cm³);OCA 为池塘沉积物有机碳埋藏量(g/m²); V_i 为第*i* 层沉积物淤积量(m³);S 为池塘水面面积(m²);OCAR 为池塘沉积物有机碳埋藏速率(g m⁻² a⁻¹);t 为有效池塘年龄(a),即距离最近一次池塘疏浚的时间,未 疏浚池塘自池塘建造年份算起。

(3)

2.4 统计分析

采用 Excel 2019 对数据进行整理与分析,运用 ArcGIS 10.5、Origin 2021 软件作图,利用 SPSS 21.0 软件对 沉积物 OCAR 和池塘面积等池塘因素、土地利用类型等流域因素进行 Pearson 相关性分析。

3 结果与分析

3.1 池塘沉积物基本理化性质

不同池塘沉积物容重差异较大,含水率未表现出明显差异,沉积物物理性质见表1,11个池塘沉积物样品 容重均值在1g/cm³以下,5号池塘沉积物容重最高,达到0.94g/cm³,1号池塘沉积物容重最小,为0.51g/cm³。所有池塘沉积物样品含水率均在45%到65%之间,其中9号池塘沉积物含水率最高,为62.63%,5、7、10号含水率较低,均小于50%。总体上,不同池塘沉积物的容重、含水率分别在垂直方向上趋势基本一致,含水率自上而下呈现出明显减小的趋势,容重则呈现出先增加后减少的趋势,沉积物含水率、容重垂直方向情况见 图 4。

池塘沉积物 TOC 含量变化区间为 1.03%—3.51%,总体呈现 TOC 含量随深度增加而逐渐降低的趋势, TOC、TN 垂直方向情况见图 4。40 cm 深度以上的沉积物 TOC 含量明显高于 40 cm 以下,在 0—40 cm 深度范 围内,TOC 含量在 1.03%—3.51%之间变化,平均值为 3.35%;40 cm 深度以下,TOC 含量变化在 1.10%— 2.50%之间,平均值为 2.57%,这可能是受到池塘周边耕地活动及沉积物压实作用的影响^[35]。TN 含量变化区 间为 0.13%—0.37%,总体呈 TN 含量随深度增加而逐渐降低的趋势,20 cm 深度以上,TN 含量变化并不显著; 20—50 cm 深度范围内,TN 含量持续降低,整体上 TN 含量平均值为 0.25%。

表 1									
Table 1 Physical properties of sediment									
池塘编号 Pond number	水深 Depth/m	淤泥深度 Sediment depth/m	容重 Dry bulk density/ (g/cm ³)	含水率 Moisture content/%	池塘编号 Pond number	水深 Depth/m	淤泥深度 Sediment depth/m	容重 Dry bulk density/ (g/cm ³)	含水率 Moisture content/%
1	1.50	1.20	0.51	54.86	7	1.30	1.20	0.77	47.23
2	2.20	1.05	0.71	52.73	8	1.30	0.65	0.77	54.88
3	2.30	0.90	0.62	55.34	9	2.40	1.50	0.54	62.63
4	1.80	1.30	0.54	55.76	10	1.30	0.40	0.89	47.13
5	1.60	0.75	0.94	45.74	11	1.40	1.86	0.75	53.89
6	1.35	1.80	0.60	60.73					



Fig.4 Basic physicochemical properties of pond sediments * 为离群值

3.2 池塘沉积物的有机碳埋藏特征

为探讨池塘沉积物有机碳埋藏特征及其空间差异,如表2所示,汇总了11口池塘的理化特征指标及其沉积物的有机碳埋藏指标。

池塘有机碳密度在 9.22—17.84 mg/cm³之间变动,均值为 12.10 mg/cm³,且个体差异明显。其中,8 号池 塘的有机碳密度最大,为 17.84 mg/cm³,这主要是因为其 TOC 含量最大,为 2.57%。通过图 2,可以看到 8 号 池塘流域林地占比高达 95%。而林地土壤表面有较多的植物凋落物及残体,腐殖化作用较强,使得其表层土 壤有机质含量较高。

池塘沉积物 OCA 在 2933.22—13457.68 g/m²区间内,均值为 9316.96 g/m²。而 OCAR 均值为 194.60 g m⁻² a⁻¹,在

142.76—293.32 g m⁻² a⁻¹范围内变化。在空间上 OCAR 的差异显著,其中 10 号池塘的 OCAR 最大,为 293.32 g m⁻² a⁻¹,是 2 号池塘的 2 倍。其中 9、10、11 号三个池塘的面积相近,在所有池塘中最小,但它们的 OCAR 差 异明显,10、11 号池塘的 OCAR 显著高于其他池塘。而 2、5、8、9 号池塘 OCAR 偏低,均在 170 g m⁻² a⁻¹以下,这与其碳密度的情况并不一致,可能是受到了流域坡度等因素的影响。

Table 2 Tonu mormation generalization									
	池塘 Pond				沉积物 Sediment				
池塘编号 Pond number	流域面积 Catchment area(CA)/ hm ²	池塘面积 Pond area (PA)/hm ²	CA:PA	年龄/a Age	TOC/%	TN/%	碳密度 Carbon density/ (mg/cm ³)	OCA/ (g/m ²)	OCAR/ (g m ⁻² a ⁻¹)
1	63.321	0.870	72.78	64	2.13	0.28	10.82	11586.68	181.04
2	25.116	0.171	146.94	58	1.87	0.24	12.00	8279.95	142.76
3	20.712	0.273	75.89	46	1.98	0.26	12.04	8076.88	175.58
4	26.099	0.415	62.82	52	1.76	0.25	9.22	9322.68	179.28
5	9.179	1.017	9.03	47	1.31	0.17	11.86	7916.32	168.43
6	11.221	0.256	43.77	54	2.09	0.25	11.43	13457.68	249.22
7	23.117	0.070	329.15	56	1.65	0.22	12.74	10114.54	180.62
8	1.859	0.089	20.96	53	2.57	0.27	17.84	8455.02	159.53
9	6.949	0.066	105.04	58	2.51	0.32	13.61	9485.94	163.55
10	8.885	0.065	136.49	10	1.19	0.18	10.37	2933.22	293.32
11	0.417	0.066	6.36	52	1.47	0.24	11.21	12857.64	247.26

表 2 池塘信息概括 Table 2 Pond information generalization

TOC:总有机碳 total organic carbon;TN:总氮 total nitrogen;OCA:有机碳埋藏量 organic carbon accumulation;OCAR:有机碳埋藏速率 organic carbon burial rate

据估算,采集的11个池塘沉积物 OCAR 均值为194.60 g m⁻² a⁻¹,远高于国内各湖泊,是云贵高原滇池的 OCAR(27.73 g m⁻² a⁻¹)^[10]的7倍,比位于长江中下游的巢湖(7.8 g m⁻² a⁻¹)^[36]高出24倍。另外,相较于国内 各地区水库 OCAR 值,本研究估算结果是我国华北地区水库 OCAR 均值(154 g m⁻² a⁻¹)的1.26倍,是东南地 区水库 OCAR 均值(70 g m⁻² a⁻¹)的2.78倍^[37]。综上,研究结果显示,池塘的有机碳埋藏速率比自然湖泊高 出一个数量级,与大型水库在同一数量级。这些估算结果证实了 Downing^[21]等的研究结论,即池塘等小型水体的有机碳埋藏速率往往高于自然湖泊和大型水库。这可能是池塘等小型水体相对较高的外源碳输入,以及 池塘内部初级生产力导致的大量有机碳沉积,这也表明富营养化程度较高的池塘可能具有更高的有机碳埋藏 速率^[38]。另外,本研究的 OCAR 估算方法有一定的局限性,估算结果均是基于采集的沉积物柱芯样本有机碳 含量计算得到,而 Taylor 等人^[22]的研究结果表明,根据沉积物柱芯样本估算的 OCA 比整个池塘挖出的沉积 物 OCA 高 13.09%,而本研究的 OCAR 是基于 OCA 计算,因此,本研究有机碳埋藏估算量可能较高。

3.3 有机碳埋藏速率影响因素分析

在本文中,主要从池塘因素和流域因素两方面探究有机碳埋藏速率的影响因素,池塘因素包括池塘水面 面积、流域面积、流域与池塘水面面积比值、TN 含量,流域因素主要考虑池塘流域内土地利用的影响。利用 SPSS 对池塘沉积物中的有机碳埋藏情况与池塘特征及其所在流域特征进行了 Pearson 相关性分析。表 3 为 池塘沉积物的 TOC 含量、有机碳密度和有机碳埋藏速率与池塘内部因素以及流域因素的 Pearson 相关系数和 显著性。

结果表明,池塘沉积物 TOC 含量与 TN 含量呈显著正相关(P<0.01),流域因素方面与池塘流域中林地面积占比呈显著正相关(P<0.05),与旱地面积占比呈显著负相关(P<0.05),其中与 TN 含量的相关系数绝对值最大,说明其影响最大。池塘沉积物有机碳密度仅与流域中旱地面积占比呈显著负相关(P<0.05)而池塘因素未与沉积物有机碳密度表现出显著相关性。与沉积物 TOC 含量、有机碳密度不同,池塘 OCAR 与流域内旱

地面积占比呈显著正相关(P<0.05),且相关系数绝对值大于前面两者。

Table 5 Correlation of organic carbon burnar with point factors and watershed factors							
影响因素 Influencing factors	总有机碳(TOC) Total organic carbon	碳密度 Carbon density	有机碳埋藏速率(OCAR) Organic carbon burial rate				
流域面积(CA) Catchment area	0.106	-0.382	-0.277				
池塘面积(PA) Pond area	-0.179	-0.304	-0.260				
CA:PA	-0.139	-0.040	-0.084				
总氮(TN) Total nitrogen	0.887 **	0.327	-0.393				
林地/% Forest	0.620 *	0.522	-0.575				
建筑用地/% Construction	-0.416	-0.446	0.263				
旱地/% Dryland	-0.652 *	-0.622 *	0.735 *				
水田/% Paddy	-0.063	-0.294	-0.035				

表3	有机碳钾藏与池塘因素和流域因素的相关性
12 3	" 你顺连戚 可 他 佑 凶 条 他 机 战 凶 条 的 怕 天 住

Table 3 Correlation of organic carbon burial with nond factors and watersh

*为 P<0.05,**为 P<0.01

4 讨论

4.1 不同地区池塘有机碳埋藏速率

其他地区池塘沉积物的有机碳埋藏速率见表4,相较于美国爱荷华州^[21](2122gm⁻²a⁻¹)的农业流域蓄水 池,本研究 OCAR 估算值(194.60gm⁻²a⁻¹)小了一个数量级,但与其他池塘的类似研究结果相比,OCAR 均值 估算结果相对偏高。例如,结果相较于城市内用于调蓄雨水的池塘明显偏高,Merriman^[24]等发现,在美国北 卡罗来纳州带有植被的池塘以 78.43gm⁻²a⁻¹的速率积累有机碳,瑞典池塘临时淹水区的 OCAR 为 75.8gm⁻² a⁻¹,新加坡城市池塘的 OCAR 为 135.2gm⁻²a⁻¹。对于这些城市池塘,浅水区和临时淹水区刻意种植了挺水 植物,植物的初级生产力相较于流域的有机质输入更加重要。而在本研究中,沉积物中的有机碳既来源于池 塘内藻类死亡、鱼类排泄物带来的有机质,还来源于流域内林地、旱地地表径流带来的泥沙。另外,通过对比 其他地区的池塘有机碳埋藏速率,可以看出,即使同一地区的池塘,其池塘 OCAR 仍表现出明显的个体差异 性,这与我们的研究结果一致。因此,除了温度、降雨这些因素外,池塘有机碳埋藏速率还可能与池塘的修建 时间、面积、汇水面积、周围土地利用情况等因素有关。

有机碳埋藏速率估算结果的准确性与估算方法密切相关,这也可能是 OCAR 估算结果相对较高的原因。 在本研究中,为了更准确地估算沉积物淤积量,根据池塘实际情况,确定了池塘边坡坡度等参数,并结合锥台 模型进行分层计算,但由于池塘水面形状不规则、淤泥面不平整等原因,仍可能高估沉积物淤积量。同时,由 于池塘年代久远、缺乏资料,通过居民调查和相关资料查阅获取的池塘建造年份和疏浚时间可靠性较弱,且难 以保证底泥疏浚的彻底性,使得估算结果产生误差。在计算过程中,由于未考虑池塘沉积物碳密度的空间异 质性,将池塘中心的碳密度扩展至整个池塘进行计算,也会造成计算结果偏高。Taylor^[22]等人提供了一种目 前最精准的方法,他们将池塘挖成均匀的大小和深度,尽可能接近自然的条件下复制池塘,两年后将沉积物全 部挖出,计算有机碳埋藏速率。该方法很好地解决了前文所述的三个问题,但该方法不适用于本研究中年代 久远、规模稍大的农业池塘。后续,可以考虑对池塘进行多点位的沉积物淤积深度测量和有机碳含量检测,探 讨碳密度的空间异质性,并结合加权插值等方法,估算整个池塘的沉积物淤积量和有机碳储量^[41]。

4.2 池塘有机碳埋藏影响因素

池塘沉积物有机碳来源分为内源和外源,内源有机碳主要是指水生植物通过光合作用固定的有机碳,外 源有机碳则主要是通过侵蚀、地表径流等方式从流域中输送至池塘的陆地碳源。池塘的有机碳埋藏速率与有 机碳来源关系紧密^[17]。而影响有机碳来源的因素众多,其中温度和降水的影响较大。温度上升,池塘及流域 内的生物量增加、营养浓度升高,初级生产力提高,从而使得有机碳埋藏量增加^[36,44–45]。另外温度越高,有机 碳的矿化作用愈强,有机碳的埋藏效率降低^[46]。降水量的增加则会通过雨水的淋溶作用增加有机碳的输入量^[11]。本文中的 11 个池塘位于同一地区,气候条件相同,因此更多地考虑周边土地利用、植被等因素的影响。

Table 4 Organic carbon burial rate in ponds in other regions								
位置	纬度	经度	年龄/a	池塘面积/hm ²	OCAR/	参考文献		
Position	Latitude	Longitude	Age	Pond area	$(g m^{-2} a^{-1})$	References		
美国佛罗里达州	_	_	14	0.622	21.8	[39]		
Florida, USA	_	_	15	0.885	61.9	[39]		
	_	_	18	1.880	126	[39]		
	_	_	23	0.790	141	[39]		
	—	_	34	1.310	217	[39]		
美国密苏里州	—	_	—	24.3	229	[38]		
Missouri, USA	—	_	—	12.1	183	[38]		
	—	—	—	5.3	256	[38]		
	—	—	—	8.1	279	[38]		
美国南卡罗来纳州	33°24′04″N	79°09′08″W	20	0.285	26	[40]		
South Carolina, USA	33°24′07″N	79°19′09″W	20	0.381	8.7	[40]		
	33°22′25″N	79°11′29″W	20	4.056	53	[40]		
	33°25′34″N	79°10′40″W	12	0.638	68	[40]		
	33°25′28″N	79°10′47″W	12	1.129	36	[40]		
	33°27′27″N	79°09′06″W	22	0.102	43	[40]		
	33°27′26″N	79°08′49″W	22	0.093	97	[40]		
	33°43′30″N	78°51′15″W	39	0.257	87	[40]		
	33°26′39″N	79°07′36″W	14	0.356	63	[40]		
	33°44′35″N	78°50'08"W	43	0.138	114	[40]		
	33°36′15″N	79°01′14″W	7	0.169	87	[40]		
	33°27′01″N	79°07′19″W	18	0.133	149	[40]		
	33°27′03″N	79°07′17″W	18	0.236	128	[40]		
	33°43′44″N	78°51′29″W	24	0.093	161	[40]		
美国俄亥俄州	39°36′32″N	84°44′01″W	24	3.68	239	[41]		
Ohio, USA	39°36′40″N	84°44′36″W	19	2.41	216	[41]		
	39°36′28″N	84°45′30″W	21	0.93	192	[41]		
瑞典隆德市	—	—	21	1.1	183	[42]		
Lund, Sweden	—	_	6	3.2	179	[42]		
	—	—	23	1.5	62	[42]		
	—	—	21	1.5	26	[42]		
	—	—	—		71	[42]		
	—	—	18	5	22	[42]		
	—	—			76	[42]		
	_	_	10	60	306	[42]		
· 甘 더) 방 ★ /b) / 팬	_	_	_	_	447	[42]		
央国佑箖伯三郡 Northumberland, UK	—	—	18/20	—	142 *	[22]		
美国俄亥俄州 Ohio, USA	—	—	_	—	246 *	[43]		
美国北卡罗来纳州 North Carolina,USA	_	_	2—15	_	78.4 *	[24]		
瑞典 Sweden	_		3—26	_	75.8 *	[24]		
新加坡 Singapore	—	—	4—15	—	135.2*	[24]		
美国北卡罗来纳州 North Carolina, USA	—	_	1—15	—	81.3 *	[23]		
荷兰马尔登 Malden, Netherlands	51°46′30″N	5°51′11″E	19	0.463	29.2	[25]		

表 4 其他地区池塘的有机碳埋藏速率

* 为池塘有机碳埋藏速率均值

http://www.ecologica.cn

池塘因素中,TOC 含量与 TN 含量呈显著正相关,这可能是因为氮素可以直接促进水中藻类的生长,提高 了池塘的初级生产力,从而增加了池塘沉积物中有机碳含量。与 Downing 等^[21]的研究结果不同,本研究中 OCAR 未与池塘水面面积表现出显著的负相关性,另外,OCAR 与流域面积(CA)、流域和池塘面积的比值 (CA:PA)均无显著相关性,这可能是由于本研究中池塘流域有机质来源复杂,干扰因素较多。池塘内部有藻 类繁殖和鱼类养殖,藻类的初级生产力和鱼类排泄物的累积均会使沉积物中有机质增加。同时流域的坡度也 会影响泥沙的输入效率,在较缓的坡度上雨水将表层土壤冲刷进池塘水体的难度更大,从而影响了池塘中的 底泥有机质含量。

流域因素中,沉积物 TOC 含量与流域中的林地面积占比呈显著正相关,可能是林地土壤表面覆盖了大量 植物凋落物,减少土壤表层光和热的获取,从而有助于土壤有机质的积累^[47]。旱地面积占比与 TOC 含量、有 机碳密度均呈显著负相关,但与 OCAR 呈显著正相关。这可能归因于池塘流域内的旱地上长年种植红薯、玉 米等作物,而耕作活动会破坏土壤团聚体结构,加速有机碳的分解,使得表层土壤有机质含量降低^[48]。同时, 耕种作物带来的土壤扰动,会使土壤发生松动,这部分土壤在降雨时更易被带入水体,使得池塘有机碳的来源 增加。池塘 OCAR 与建筑用地、水田面积占比均无显著关系,流域中的居民住宅数量少且位置分散,难以对池 塘有机碳输入造成严重影响。有研究发现,水田相较于旱地有机质分解速率更大^[49],但流域中水田面积占比 不大,影响并不明显。后续的研究中可以采用正构烷烃单体碳同位素等方法,进一步追溯池塘中的有机碳来 源和组成,更加准确地讨论流域内各种土地利用类型对池塘有机碳沉积的影响。

4.3 池塘对区域碳循环的影响

本文的研究结果表明,池塘具有较强的储碳能力,且比自然湖泊和水库的碳汇作用更加突出,然而,池塘中的微生物也可通过降解有机物,向大气中排放大量的 CH₄和 CO₂气体^[20]。瑞典一项研究结果表明^[42],瑞典小池塘的 CO₂排放量是沉积物碳积累量的 1.8—37.5 倍,而荷兰^[25]的一个占地面积 0.463 hm²的城市池塘,有 机碳埋藏速率仅为 29.2 g m⁻² a⁻¹,大大低于碳排放量(CO₂和 CH₄排放量总和)391 g m⁻² a⁻¹。因此,尽管池塘 沉积物中碳的积累率高于草地、森林等其他生态系统,但由于向大气中排放更多的二氧化碳和甲烷,池塘通常 被认为是碳的净来源。在国内,水面面积<0.1 km²的池塘和小水库的数量众多,超过水体总量的 98.65%,这部分水体在碳循环中发挥着重要作用,国内已有学者对池塘气体排放进行了通量观测研究,申雅莉^[50]对湖南 省一个典型农业源头流域的塘库进行了为期一年的连续监测,通过漂浮式静态通量箱技术得到了 11 个月的 CH₄和 CO₂排放通量数据。为便于比较池塘碳排放和碳沉积的作用,我们参考了 Karl 等人^[42]的比较方法,将 申雅莉^[50]研究结果中 CH₄、CO₂排放总量转化为 194.99 g C m⁻² a⁻¹,而本研究中的有机碳埋藏速率为142.76—293.32 g C m⁻² a⁻¹,因此池塘的碳沉积量是碳排放总量的 0.73—1.5 倍。然而,小池塘碳通量变化较大,极易 受到降雨、温度、流域活动等因素的影响,我们采用的碳排放数据同样来源于亚热带丘陵山区池塘,尽可能避 免气候带来的影响,但不同池塘不同时间的池塘碳通量仍存在差异,因此,后期可以对本文中的池塘碳通量进 行长期的实地观测,并进行更为精细的计算和比较,从而了解池塘这一类小型水体对区域碳循环的潜在影响。

5 结论

本文选取丘陵山区池塘进行研究,分析池塘沉积物特性并估算沉积物有机碳埋藏速率;基于研究区遥感 影像和相关性分析,探究有机碳埋藏影响因素;对比湖泊、水库及其他地区池塘碳沉积研究成果,探究池塘碳 沉积能力。最终得出以下研究结论:(1)不同池塘沉积物容重、含水率分别在垂直方向上趋势相同,含水率自 上而下逐渐减小,容重则呈现出先增加后减少的趋势。池塘沉积物 TOC、TN 含量总体上均呈现出随深度增加 而逐渐降低的趋势;(2)池塘之间有机碳埋藏速率差异较大,在 142.76—293.32 g m⁻² a⁻¹之间变化,均值为 194.60 g m⁻² a⁻¹,这一结果比国内自然湖泊高出一个数量级,略高于其他池塘的类似研究结果;(3)相关性分 析结果表明,池塘有机碳埋藏速率与流域内旱地面积占比呈显著正相关(*P*<0.05),与池塘面积无显著相关 性。国内池塘普遍面积较小,但数量众多,是不容忽视的地理景观要素。因此,在进行碳收支计算时,应该充 分考虑池塘等这类小型水体的作用,同时也要进一步研究池塘有机碳的沉积、矿化、埋藏过程及其驱动因素, 从而更好地认识池塘等小型水体在区域碳循环中的作用。

参考文献(References):

- [1] Regnier P, Resplandy L, Najjar R G, Ciais P. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. Nature, 2022, 603(7901): 401-410.
- [2] Cole J J, Prairie Y T, Caraco N F, McDowell W H, Tranvik L J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Downing J A, Middelburg J J, Melack J. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems, 2007, 10(1): 172-185.
- [3] Pilla R M, Griffiths N A, Gu L H, Kao S C, McManamay R, Ricciuto D M, Shi X Y. Anthropogenically driven climate and landscape change effects on inland water carbon dynamics: What have we learned and where are we going? Global Change Biology, 2022, 28(19): 5601-5629.
- [4] Smith S V, Renwick W H, Buddemeier R W, Crossland C J. Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(3): 697-707.
- [5] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, Loiselle S A, Striegl R G, Ballatore T J, Dillon P, Finlay K, Fortino K, Knoll L B, Kortelainen P L, Kutser T, Larsen S, Laurion I, Leech D M, McCallister S L, McKnight D M, Melack J M, Overholt E, Porter J A, Prairie Y, Renwick W H, Roland F, Sherman B S, Schindler D W, Sobek S, Tremblay A, Vanni M J, Verschoor A M, von Wachenfeldt E, Weyhenmeyer G A. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. Limnology and Oceanography, 2009, 54(6part2): 2298-2314.
- [6] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands. Geology, 1998, 26(6): 535.
- [7] Aufdenkampe A K, Mayorga E, Raymond P A, Melack J M, Doney S C, Alin S R, Aalto R E, Yoo K. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(1): 53-60.
- [8] Mulholland P J, Elwood J W. The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle. Tellus, 1982, 34(5): 490-499.
- [9] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: coupling weathering and erosion to carbon burial. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12(2): 231-257.
- [10] Huang C C, Zhang L L, Li Y M, Lin C, Huang T, Zhang M L, Zhu A X, Yang H, Wang X L. Carbon and nitrogen burial in a plateau lake during eutrophication and phytoplankton blooms. Science of the Total Environment, 2018, 616/617; 296-304.
- [11] Lan J H, Xu H, Liu B, Sheng E G, Zhao J T, Yu K K. A large carbon pool in lake sediments over the arid/semiarid region, NW China. Chinese Journal of Geochemistry, 2015, 34(3): 289-298.
- [12] Waters M N, Kenney W F, Brenner M, Webster B C. Organic carbon sequestration in sediments of subtropical Florida lakes. PLoS One, 2019, 14 (12): e0226273.
- [13] Chmiel HE, Kokic J, Denfeld BA, Einarsdóttir K, Wallin MB, Koehler B, Isidorova A, Bastviken D, Ferland M, Sobek S. The role of sediments in the carbon budget of a small boreal lake. Limnology and Oceanography, 2016, 61(5): 1814-1825.
- [14] 张风菊,薛滨,姚书春.大暖期中国湖泊沉积物有机碳储量的初步估算研究.第四纪研究, 2018, 38(4): 887-899.
- [15] 赖珊, 万宏滨, 唐芳, 杨浩, 黄昌春, 张志刚, 黄涛. 抚仙湖沉积物有机碳埋藏特征及来源解析. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1246-1256.
- [16] 杨玉雪,向鹏,卢玮琦,王仕禄.贵州乌江渡水库沉积速率及碳氮埋藏通量估算.地球与环境,2017,45(1):66-73.
- [17] 郝盛吞,周爱锋,张晓楠,吴铎,尹丽颖.湖泊沉积有机碳埋藏效率及其影响要素研究进展.地球环境学报,2017,8(4):292-306.
- [18] 高进长,龙翼,张信宝,贺秀斌,王铭烽.长寿湖水库沉积物有机碳的垂直变化特征.水土保持研究,2016,23(5):80-84.
- [19] Mendonca R, Müller RA, Clow D, Verpoorter C, Raymond P, Tranvik LJ, Sobek S. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. Nature communications, 2017, 8(1): 1694.
- [20] Holgerson M A, Raymond P A. Large contribution to inland water CO2 and CH4 emissions from very small ponds. Nature Geoscience, 2016, 9 (3): 222-226.
- [21] Downing J A, Cole J J, Middelburg J J, Striegl R G, Duarte C M, Kortelainen P, Prairie Y T, Laube K A. Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22(1): GB1018-1.
- [22] Taylor S, Gilbert P J, Cooke D A, Deary M E, Jeffries M J. High carbon burial rates by small ponds inthelandscape. Frontiers in Ecology and the Environment, 2019, 17(1): 25-31.
- [23] Moore T L C, Hunt W F. Ecosystem service provision by stormwater wetlands and ponds A means for evaluation? Water Research, 2012, 46 (20): 6811-6823.
- [24] Merriman L S, Moore T L C, Wang J W, Osmond D L, Al-Rubaei A M, Smolek A P, Blecken G T, Viklander M, Hunt W F. Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones. Science of the Total Environment, 2017, 583: 133-141.
- [25] van Bergen T J H M, Barros N, Mendonça R, Aben R C H, Althuizen I H J, Huszar V, Lamers L P M, Lürling M, Roland F, Kosten S. Seasonal and diel variation in greenhouse gas emissions from an urban pond and its major drivers. Limnology and Oceanography, 2019, 64(5): 2129-2139.
- [26] Gilbert P J, Taylor S, Cooke D A, Deary M E, Jeffries M J. Quantifying organic carbon storage in temperate pond sediments. Journal of Environmental Management, 2021, 280: 111698.

- [27] 吕明权,吴胜军,马茂华,黄平,温兆飞,陈吉龙.中国小型水体空间分布特征及影响因素.中国科学:地球科学,2022,52(8): 1443-1461.
- [28] Zhu Y Z, Purdy K J, Eyice Ö, Shen L D, Harpenslager S F, Yvon-Durocher G, Dumbrell A J, Trimmer M. Disproportionate increase in freshwater methane emissions induced by experimental warming. Nature Climate Change, 2020, 10(7): 685-690.
- [29] Ollivier Q R, Maher D T, Pitfield C, Macreadie P I. Punching above their weight: large release of greenhouse gases from small agricultural dams. Global Change Biology, 2019, 25(2): 721-732.
- [30] Peacock M, Audet J, Bastviken D, Cook S, Evans C D, Grinham A, Holgerson M A, Högbom L, Pickard A E, Zieliński P, Futter M N. Small artificial waterbodies are widespread and persistent emitters of methane and carbon dioxide. Global Change Biology, 2021, 27(20): 5109-5123.
- [31] 赵佳玉,张弥,肖薇,王伟,吴红艳,张圳,肖启涛,胡诚,于洲,曹正达,徐敬争,刘寿东,李旭辉.基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量.环境科学,2017,38(1):41-51.
- [32] 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶.小型池塘水-气界面 CH₄ 冒泡通量的观测.环境科学, 2018, 39(2): 691-702.
- [33] 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟.亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征.环境科学,2016,37 (12):4552-4559.
- [34] 龙翼,张信宝,李敏,李勉,张云奇.陕北子洲黄土丘陵区古聚湫洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究.科学通报,2009,54(1): 73-78.
- [35] Trolle D, Hamilton D P, Pilditch C A. Evaluating the influence of lake morphology, trophic status and diagenesis on geochemical profiles in lake sediments. Applied Geochemistry, 2010, 25(5): 621-632.
- [36] Yu Q B, Wang F, Yan W J, Zhang F S, Lv S C, Li Y Q. Carbon and nitrogen burial and response to climate change and anthropogenic disturbance in Chaohu Lake, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(12): 2734.
- [37] 雒钊. 水库底泥碳沉积特性研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
- [38] Pittman B, Jones J R, Millspaugh J J, Kremer R J, Downing J A. Sediment organic carbon distribution in 4 small northern Missouri impoundments: implications for sampling and carbon sequestration. Inland Waters, 2013, 3(1): 39-46.
- [39] Goeckner A H, Lusk M G, Reisinger A J, Hosen J D, Smoak J M. Florida's urban stormwater ponds are net sources of carbon to the atmosphere despite increased carbon burial over time. Communications Earth & Environment, 2022, 3(1): 53.
- [40] Schroer W F, Benitez-Nelson C R, Smith E M, Ziolkowski L A. Drivers of sediment accumulation and nutrient burial in coastal stormwater detention ponds, South Carolina, USA. Ecosystems, 2018, 21(6): 1118-1138.
- [41] Rogers M N, Williamson T J, Knoll L B, Vanni M J. Temporal patterns in sediment, carbon, and nutrient burial in ponds associated with changing agricultural tillage. Biogeochemistry, 2022, 159(1): 87-102.
- [42] Karl L, Simon L. Organic carbon burial in constructed ponds in Southern Sweden. Earth Science, Systems and Society, 2023, 3: 10061.
- [43] Knoll L B, Vanni M J, Renwick W H, Kollie S. Burial rates and stoichiometry of sedimentary carbon, nitrogen and phosphorus in Midwestern US reservoirs. Freshwater Biology, 2014, 59(11): 2342-2353.
- [44] Heathcote A J, Downing J A. Impacts of eutrophication on carbon burial in freshwater lakes in an intensively agricultural landscape. Ecosystems, 2012, 15(1): 60-70.
- [45] Xu H, Lan J H, Liu B, Sheng E G, Yeager K M. Modern carbon burial in Lake Qinghai, China. Applied Geochemistry, 2013, 39: 150-155.
- [46] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, Premke K, Sobek S, Tranvik L J. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. Nature, 2010, 466(7305): 478-481.
- [47] 王莉,张强,牛西午,杨治平,张建杰.黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响.中国生态农业学报,2007,15(4): 53-56.
- [48] Zhao Z H, Gao S F, Lu C Y, Li X Y, Li F, Wang T Y. Effects of different tillage and fertilization management practices on soil organic carbon and aggregates under the rice-wheat rotation system. Soil and Tillage Research, 2021, 212: 105071.
- [49] 黄东迈,朱培立,王志明,余晓鹤.旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑.土壤学报,1998,35(4):482-492.
- [50] 申雅莉. 典型农业源头流域塘库水体氮磷含量与温室气体排放的时空特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.