

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.022

基于 EFDC 模型的太湖微塑料迁移规律及污染概率分布模拟

孙昊^{1,2}, 陈求稳^{1,2}, 丁珏², 闫兴成²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:通过耦合太湖环境流体动力学模型与拉格朗日粒子模型, 计算了太湖6个主要输入源的微塑料粒子漂移路径, 分析了影响微塑料粒子漂移路径的主要因素, 进而评估了太湖湖区的微塑料污染概率。结果表明:微塑料输入源位置和附近湖流是影响微塑料迁移和归趋结果的重要影响因素;受湾内环流影响, 湖湾是太湖微塑料的主要归趋位置, 竺山湖和贡湖除受纳自身输入源的微塑料粒子, 还受纳来自西、南沿岸区的微塑料粒子;竺山湖是太湖微塑料污染概率最高的湖区, 污染主要来自湖湾自身输入源和西沿岸区输入源, 其次为西沿岸区, 其污染主要来自自身输入源和南沿岸区输入源。

关键词:微塑料迁移; 湖流; 环境流体动力学模型; 污染概率; 太湖

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)06-0169-09

Simulation of microplastic migration regularity and pollution probability distribution in Taihu Lake based on EFDC model/SUN Hao^{1,2}, CHEN Qiwen^{1,2}, DING Jue², YAN Xingcheng² (1. College of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Eco-environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The drift paths of microplastic particles from six main input sources of Taihu Lake were calculated by coupling the environmental fluid dynamics code (EEDC) model with the Lagrangian particle model. The main factors affecting the drift path of microplastic particles were analyzed, and the microplastic pollution probability in Taihu Lake was further assessed. The results show that the location of microplastic input sources and nearby lake current are important factors determining the migration destination of microplastics. The lake bay is the main destination of microplastics in Taihu Lake due to the effect of circulation in the bay. Zhushan Lake and Gonghu Lake receive microplastic particles from their own input sources, as well as microplastic particles from the western and southern coastal areas. Zhushan Lake has the maximum microplastic pollution probability in Taihu Lake, with microplastic particles mainly from the input sources of the its own lake bay and the western coastal area. The microplastic pollution probability in the western coastal area ranks the second place, with microplastic pollution mainly from the input sources of itself and the southern coastal area.

Key words: microplastic migration; lake current; environmental fluid dynamics code model; pollution probability; Taihu Lake

塑料因其适用性强且价格低廉, 在各个行业被广泛使用。20世纪以来, 塑料产业迅猛发展, 世界塑料总产量约83亿t^[1], 这不可避免导致塑料向自然环境的释放^[2]。2004年, 英国科学家汤普森提出微塑料的概念, 将环境中粒径小于5 mm的塑料颗

粒定义为微塑料^[3]。研究发现, 微塑料可通过物理、化学载体等多重作用危害生态环境健康, 甚至会随着食物链由低营养级向高营养级传递, 对人类食品安全造成潜在威胁^[4-5]。并且, 微塑料因其污染范围大, 影响时间持久, 已经成为环境科学领域近

基金项目:国家自然科学基金项目(52209097, 51909166); 江苏省青年基金项目(BK20220208); 中央级科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y921020); 江苏省水利科技项目(2019024)

作者简介:孙昊(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: 894263358@qq.com

通信作者:陈求稳(1974—), 男, 研究员, 博士, 主要从事生态水力学和水环境信息研究。E-mail: qwchen@nhri.cn

10 年来十大热点研究之一^[6]。

微塑料在全球河流、湖泊、水库、湿地、海洋等水系统中被广泛发现^[7],国内外学者针对微塑料污染开展了大量研究^[8]。Lebreton 等^[9-11]通过模型或实测数据估算了全球河流塑料污染的输海通量,结果显示内陆河流输入是海洋微塑料的重要来源。湖泊作为淡水系统的主要组成部分,在供水、养殖等水文循环方面发挥着重要作用^[12],同样也是水体微塑料的重要归宿。Eriksen 等^[13]对北美五大湖进行了微塑料污染研究,发现了大量球状微塑料的存在;Anderson 等^[14]对加拿大温尼伯湖展开调查,证明了温尼伯湖与五大湖微塑料污染水平接近;Yuan 等^[15]发现生活污水和渔业可能是鄱阳湖微塑料的主要来源;Wang 等^[16]发现乌梁素海湖水体和沉积物中微塑料最大丰度分别达到 10 120 个/m³、24 个/kg;Xiong 等^[17]发现旅游业是青海湖微塑料的重要来源;Zhang 等^[18]对太湖水体及入湖河道微塑料进行调研时,发现太湖水体微塑料丰度呈现出“北高南低”的分布状况,还发现入湖河道微塑料的输入对太湖的影响不可忽视;Su 等^[19]在研究中发现太湖地表水微塑料丰度达到 3.4 ~ 25.8 个/L,湖泊西北部是污染最严重的地区。

在对水体中微塑料污染现状的大量研究中,尚未解析入湖河道微塑料输入和湖泊微塑料迁移归趋的关系和对湖泊微塑料污染分布进行分析评估。微塑料通过入湖河流汇入湖泊,其密度普遍低于水密度,因此会漂浮于水面并随水流迁移,微塑料随水流迁移和归趋使湖泊不同湖区微塑料污染产生差异。已有对微塑料迁移规律的研究成果主要集中在海洋研究中,如王许琨等^[20]总结出海洋微塑料远距离迁

移的主要动力是洋流;Van Wijnen 等^[21-22]对海洋微塑料模拟估算时发现,微塑料源的位置决定了其迁移的趋势,微塑料会在人口密集的海岸滞留;Onink 等^[23]发现微塑料分布主要受大洋环流和季风影响。微塑料在迁移过程中受迁移环境的影响,与有机污染物相互吸附^[24],发生悬浮或远距离迁移,给微塑料污染控制带来了极大的困难^[25]。采用数值模拟方法对微塑料进行粒子追踪以预测和评估不同环境中微塑料的迁移和归趋可以为微塑料污染控制提供关键依据^[26]。本文基于三维环境流体动力学(environmental fluid dynamics code, EFDC)模型和拉格朗日粒子模型的耦合,模拟和分析了太湖不同微塑料输入源的微塑料迁移和归趋结果,结合各源的微塑料输入通量,评估太湖微塑料污染概率分布,解析高污染概率湖区的负荷来源,为太湖微塑料防控提供理论基础。

1 研究区概况

太湖是中国第三大淡水湖,水域面积 2 338 km²,平均水深 1.9 m,为典型的亚热带浅水湖泊^[27-28]。太湖位于中国工业化程度高、人口密度高的地区,连接江苏、浙江和上海,是当地的重要饮用水源^[29-30]。太湖共包括 11 个湖区及 31 条主要出入湖河道^[31](表 1、图 1)。竺山湖和西沿岸区周边地区河流均以入湖河道为主,共有 11 条入湖河道和 3 条出/入湖双向河道,两个湖区入湖水量占整个太湖总入湖水量的 80%;竺山湖微塑料入湖源(PZ)主要来自太滬运河(入湖河道 9)和殷村港(入湖河道 10),通量为 26.4 万个/s;西沿岸区有 3 个微塑料入湖源,分别为社渚桥—乌溪桥(入湖河道 11 ~ 15, PX1)、城

表 1 太湖出入湖河道及流量

Table 1 Inflow and outflow channels and flow rates of Taihu Lake

湖区	河道 序号	边界排口	属性	出湖流量/ 万亿 m ³	入湖流量/ 万亿 m ³	湖区	河道 序号	边界排口	属性	出湖流量/ 万亿 m ³	入湖流量/ 万亿 m ³
贡湖	1	望虞河	出/入流	0.203 2	0.153 2	西沿岸区	17	大港桥站	入流	0	0.004 6
	2	沿湖小闸段	出流	0.025 3	0		18	夹浦港	入流	0	0.001 1
梅梁湖	3	大渲河泵站	出流	0.126 5	0		19	合溪新港河	出/入流	0.001 9	0.049 3
	4	梁溪河	出流	0.181 9	0		20	长兴港河	出/入流	0.003 0	0.079 2
	5	五里湖闸站	入流	0	0.003 4		21	杨家浦港	出/入流	0.002 6	0.069 3
竺山湖	6	直湖港闸站	入流	0	0.005 8	南沿岸区	22	杨家埠站	出/入流	0.015 0	0.253 3
	7	武进港闸站	入流	0	0.058 4		23	杭长桥站	出/入流	0.230 1	0.152 0
	8	雅浦桥站	入流	0	0.038 8		24	幻溇闸段	出/入流	0.389 2	0.101 1
	9	太滬运河	入流	0	0.325 0	东太湖	25	团结桥段	出流	0.005 5	0
	10	殷村港	入流	0	0.277 0		26	太浦闸站	出流	1.489 1	0
西沿岸区	11	社渚桥	入流	0	0.063 3		27	联湖桥段	出流	0.017 1	0
	12	官渚桥	入流	0	0.051 3		28	瓜泾口段	出流	0.509 3	0.016 6
	13	洪巷港桥	入流	0	0.096 3		29	苏东运河	出流	0.005 0	0
	14	大浦桥	入流	0	0.268 3	胥湖	30	胥江	出/入流	0.023 6	0.021 6
	15	乌溪桥	入流	0	0.111 2	漫山湖	31	穹窿桥	出/入流	0.017 5	0.016 1
	16	城东港桥	入流	0	0.995 3						

东港桥—大港桥站(入湖河道 16~17, PX2)、夹浦港—长兴港河(入湖河道 18~20, PX3), 微塑料通量分别为 60.3 万、4.2 万、4.0 万个/s。贡湖内引江济太望虞河通道为出/入湖双向河道(河道 1), 年出湖水量高于入湖水量 20%; 望虞河为主要的贡湖微塑料源(PG), 微塑料通量为 0.9 万个/s。南沿岸区有 3 条出/入湖双向河道, 处于杨家埠站—幻漉闸段(河道 22~24)。杨家埠站的入湖水量占此湖区入湖水量的 50%, 且杨家埠站是南沿岸区的主要微塑料源(PN), 微塑料通量为 3.6 万个/s^[18]。梅梁湖和东太湖区以出湖河道为主, 两个湖区的出湖水量占整个太湖入湖水量的 80%, 出湖水量均远大于入湖水量。漫山湖、胥湖以出入湖河道为主, 漫山湖和胥湖的河道水量较小, 对太湖整个湖区的影响较小。湖心区的水域面积超过 700 km², 在整个太湖水域面积占比超过 30%。

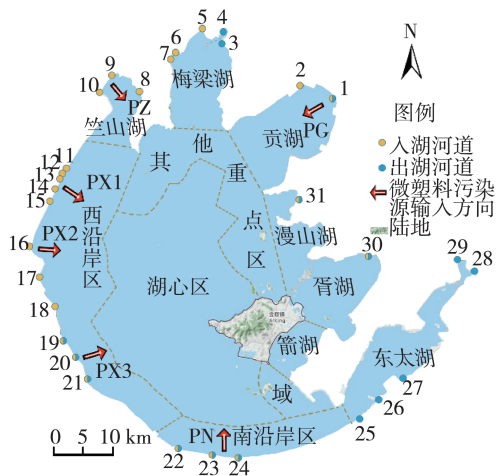


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 模型构建

本文采用威廉玛丽大学弗吉尼亚海洋科学研究所开发的三维 EFDC 模型计算太湖水动力场背景下的微塑料输移过程。模型计算范围为整个太湖水域(119°52'19.2"E~120°35'49.2"E, 30°55'8.4"N~31°32'56.4"N)。采用太湖二轮清淤后的水深数据并统一修正为 85 黄海高程基面, 插值后得到模型网格。采用 EFDC 生成太湖模型计算网格(图 2), 网格为矩形正交网格, 网格大小为 400 m×400 m, 共划分 15525 个网格, 垂向分 5 层。

在太湖水动力模型的基础上, 基于 EFDC 拉格朗日粒子追踪模块, 模拟太湖各湖区输入源输入的微塑料在太湖中的输移过程。拉格朗日粒子追踪控制方程和运动微分方程分别为

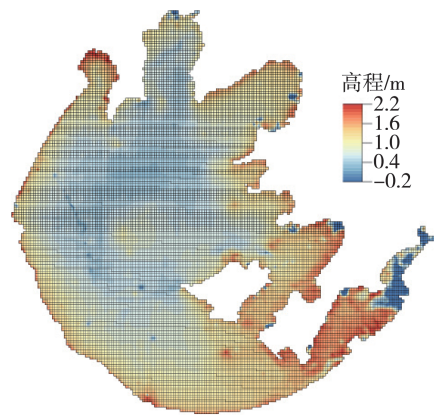


图2 模型网格

Fig.2 Model grid

$$\frac{\delta c}{\delta t} + \text{div}(\mathbf{vc}) = \frac{\delta}{\delta x} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(D_H \frac{\delta c}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(D_V \frac{\delta c}{\delta z} \right) \quad (1)$$

$$dx = dx_d + dx_r = \left(u + \frac{\delta D_H}{\delta x} \right) dt + (2p - 1) \sqrt{2D_H dt} \quad (2)$$

$$dy = dy_d + dy_r = \left(v + \frac{\delta D_H}{\delta y} \right) dt + (2p - 1) \sqrt{2D_H dt} \quad (3)$$

$$dz = dz_d + dz_r = \left(w + \frac{\delta D_V}{\delta z} \right) dt + (2p - 1) \sqrt{2D_V dt} \quad (4)$$

式中: c 为浓度; $\mathbf{v}$ 为流体流动的速度; D_H 、 D_V 分别为水平扩散系数和垂直扩散系数; dt 为时间单元; 下标 d、r 分别表示平流输运分量和随机输运分量; u 、 v 、 w 分别为边界拟合正交曲线坐标 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; p 为分布均值为 0.5 的随机变量产生的随机值, 进行转换时, 使用随机分量 $2p - 1$, 均值为 0, 范围为 $-1 \sim 1$ 。为了确定粒子的拉格朗日轨迹, 将式(2)~(4)纳入了 EFDC 模型。

2.2 初始条件和边界条件设置

通过国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)获得太湖区域的风场、降雨、蒸发等大气数据。采用 2020 年太湖流域年平均风速 4.5 m/s、年降水量 1489.3 mm、年水面蒸发量 856 mm 设置模型的大气条件。温度和盐度初始场采用 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 9 月 6 日日尺度资料的平均值, 设置初始水位为太湖平均水位 4.2 m, 初始流速为 0, 模型时间步长为 4 s。模型运行 5 d 后稳定, 释放微塑料粒子。根据太湖出入湖河道情况(图 1), 设置 31 个边界排口, 各排口名称及属性见表 1。

2.3 工况设置

在太湖 6 个主要微塑料输入源(PG、PZ、PX1、PX2、PX3、PN)分别投入 150 个微塑料示踪粒子, 模

拟不同输入源微塑料粒子的漂移和归趋。模型设置漂移计算时间为 250 d, 每隔 2 h 测量和输出一次粒子运动轨迹。

2.4 湖区微塑料污染概率计算方法

湖区微塑料污染概率由经过模型网格的微塑料粒子数目计算得到。在任意微塑料负荷源 s_i 连续释放情况下, T 时刻内湖区经过网格 (x, y) 的粒子数为

$$L_i(x, y, T) = \sum_{k=1}^T l_i(x, y, k) \quad (5)$$

式中: $l_i(x, y, k)$ 为微塑料输入源 i ($i = 1, 2, \dots, 6$ 分别对应 PG、PZ、PX1、PX2、PX3 和 PN 输入源) 连续释放情况下, k 时刻经过网格 (x, y) 的粒子数目。6 个微塑料输入源同时释放时, 湖区网格 (x, y) 的微塑料污染概率为

$$P(x, y, T) = \sum_{i=1}^6 L_i(x, y, T) F_i / (mT \sum_{i=1}^6 F_{s_i}) \quad (6)$$

式中: F_i 为输入源 i 的微塑料通量; m 为模型中释放的粒子数目。对于整个太湖水域来说, $\sum_x \sum_y P(x, y, T) = 1$ 。

3 结果与分析

3.1 模型验证

利用太湖小焦山观测点监测数据对水动力模型模拟结果进行验证。小焦山观测点位于 $120^{\circ}05'32.53''E, 31^{\circ}20'57.79''N$, 湖流监测时段为 2020 年 11 月 15—16 日, 水位监测时段为 2020 年 11 月 1—30 日。流速、流向、水位验证结果见图 3, 可见模型模拟结果与实测结果基本一致, 流速、流向、水位拟合优度 (R^2) 分别达到 0.85、0.74、0.88。模型能够反映研究区流场的基本特征与变化规律, 可在此基础上进一步对微塑料迁移进行模拟。

3.2 不同输入源微塑料迁移特征

3.2.1 迁移路径

由图 4 可见, 太湖 6 个微塑料主要输入源 (PG、PZ、PX1、PX2、PX3、PN) 输入的微塑料粒子漂移路径有显著差异。贡湖输入源 (PG) 和竺山湖输入源 (PZ) 的微塑料粒子主要在湖湾内漂移, 而西沿岸区输入源 (PX1、PX2、PX3) 和南沿岸区输入源 (PN) 的微塑料粒子则随湖流经过湖心区。

太湖竺山湖、梅梁湖、贡湖 3 个湖湾都存在湾内环流 (图 5)。贡湖内部环流被湖区外部流线切分为两部分, 一部分为湖区西北角环流, 一部分为湖区东

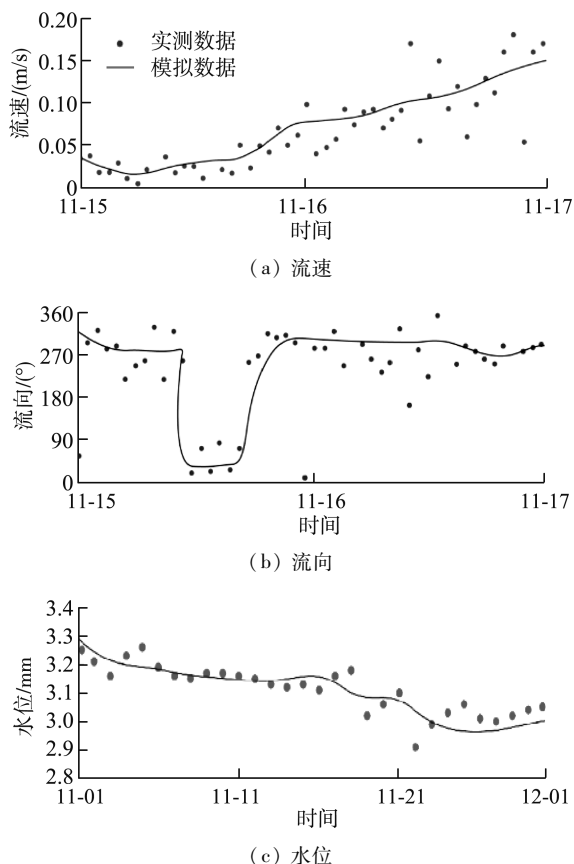


图 3 模型验证

Fig. 3 Model verification

南角环流。结合 PG 输入的微塑料粒子漂移路径可以发现, 输入的微塑料进入贡湖后分别随两个环流迁移, 绝大多数随东南角环流迁移。竺山湖环流处于湖区东南部, 且竺山湖与西沿岸区、湖心区的交界处存在一个较大环流。结合 PZ 输入的微塑料粒子漂移路径可以发现, 输入的微塑料沿湾内环流在竺山湖内部迁移, 且被湖区交界处环流阻挡, 无法进入其他湖区。

太湖西南部存在一个大环流, 沿南岸、西岸向北流动, 环流中心流线较为闭合。西沿岸区 PX1、PX2、PX3 输入的微塑料粒子首先进入大环流向北运移, 一直达到竺山湖, 然后部分随竺山湖湾内环流漂移, 部分沿着湖区交界处环流进入湖心区, 并沿着大环流向南迁移又回到湖西区。PX1、PX2、PX3 输入的微塑料粒子漂移路径总体比较相似, 其中 PX2 输入的微塑料粒子更少进入湖心区。

太湖南沿岸区受到 3 股湖流的影响, 一是沿西岸向北的太湖大环流, 二是向湖心区直达梅梁湖的湖流, 三是从东南向北的太湖东部湖流。南沿岸区 PN 输入的微塑料粒子同时受到这 3 股湖流影响, 漂移路径分为 3 组, 大部分粒子沿湖流向湖心区运动, 少部分随大环流和东部湖流运动。PN 输入的微塑料粒子可到达太湖北部 3 个湖湾。

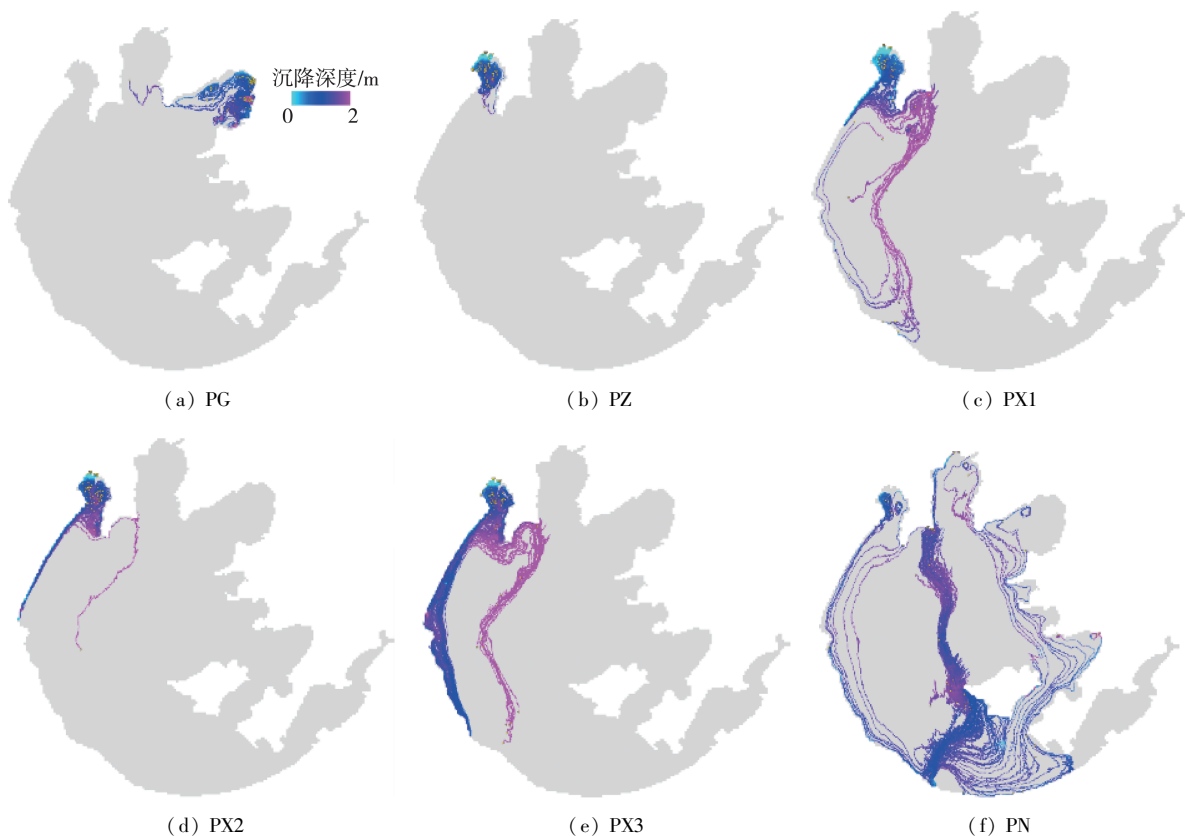


图4 不同输入源微塑料粒子漂移路径

Fig. 4 Drift paths of microplastic particles from different input sources



图5 太湖流场流线

Fig. 5 Streamlines in Taihu Lake

3.2.2 迁移范围

对在计算时段内每个输入源输入的微塑料粒子经过湖区面积累计可知,各输入源粒子漂移面积从大到小依次为 PN、PX3、PX1、PG、PX2、PZ,数值分别为 350、170、114.5、95.4、100.6、30.1 km²。对微塑料粒子平均漂移距离与漂移时间进行线性拟合,拟合结果良好($R^2 = 0.642 \sim 0.872$) (图 6)。PG 输入的微塑料粒子大多在贡湖范围内漂移,其漂移距离随时间的增长速度,即漂移速率在各输入源中最小。PZ 输入的微塑料粒子只在竺山湖内漂移,粒子漂移

范围最小,其漂移速率与 PG 接近。PX3 输入的微塑料粒子较 PX1 和 PX2 有更大的漂移范围,沿西岸漂移进入湖心区的粒子更多,漂移速率与 PX1、PX2 接近。PN 输入的微塑料粒子整体分 3 条路径由太湖南岸向太湖北部漂移,漂移范围在 6 个输入源中最大,且平均漂移速率也最高。

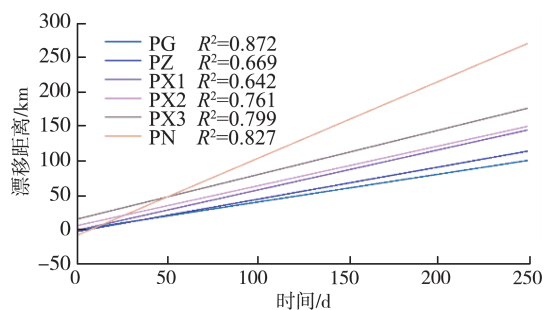


图6 微塑料粒子漂移距离模拟结果

Fig. 6 Simulation results of microplastic particle drift distance

3.3 太湖湖区微塑料污染概率及其构成

利用输入源负荷值及水动力模型对微塑料粒子漂移的模拟结果,通过式(5)(6)对太湖微塑料污染概率进行评估,评估结果如图 7 所示。太湖微塑料污染风险整体呈现“北高南低,西高东低”的形势。污染概率排名前 6 的湖区分别为竺山湖、西沿岸区、梅梁湖、贡湖、其他重点区、湖心区。微塑料污染风

险最高的湖区为竺山湖,湖区总污染概率为0.38;其次为西沿岸区,湖区总污染概率达到0.27。贡湖、梅梁湖、湖心区、其他重点区总污染概率较为接近,分别为0.10、0.12、0.05、0.07。南沿岸区与东部湖区(东太湖、漫山湖、胥湖)污染概率较低,总计为0.01。

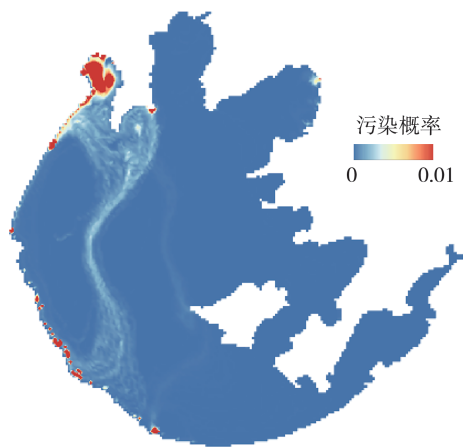


图7 微塑料归趋及重要湖区的污染概率

Fig.7 Destination of microplastic migration and pollution probability of important lake areas

如表2所示,PG输入源贡献了贡湖75%的微塑料污染,其次为PZ输入源,其贡献率为10%;梅梁湖污染主要来自PZ、PX2、PX3输入源,贡献率分别为31%、27%、24%;竺山湖污染来源与梅梁湖相似,主要来自PZ、PX2、PX3输入源,贡献率分别为38%、25%、20%;西沿岸区污染主要来自PX1、PX2、PX3、PN输入源,贡献率较为均匀;南沿岸区、湖心区、太湖东部污染主要来自PN输入源,不同区域PN输入源贡献率分别为100%、75%、77%。

表2 输入源微塑料污染贡献率

Table 2 Contribution rate of different input sources to microplastic pollution

湖区	输入源微塑料污染贡献率/%					
	PG	PZ	PX1	PX2	PX3	PN
贡湖	75	10	6	5	3	1
梅梁湖	4	31	14	27	24	4
竺山湖	0	38	16	25	20	1
西沿岸区	0	0	25	20	21	34
南沿岸区	0	0	0	0	0	100
湖心区	0	0	21	0	4	75
其他重点区	0	0	41	7	27	25
东部湖区	0	0	4	17	2	77

3.4 讨论

3.4.1 太湖微塑料入湖负荷与迁移特征

太湖微塑料整体呈现出由南向北的迁移规律,输入源的位置对微塑料粒子的漂移路径和归趋起着决定性作用。太湖6个主要微塑料粒子输入源,其中2个(PG、PZ)处于湖湾内,4个(PX1、PX2、PX3、

PN)分布于太湖西、南沿岸。湖湾(贡湖、竺山湖)内部存在湾内环流,西、南沿岸区首先受到太湖大环流影响。从湖湾输入源输入太湖的微塑料粒子绝大多数随湾内环流在湖湾内漂移,从PG输入的微塑料粒子绝大多数归趋于贡湖,从PZ输入的微塑料粒子绝大多数归趋于竺山湖,微塑料粒子易归趋于人口密集与湖流舒缓的区域^[22]。受太湖大环流影响,西、南沿岸区输入的微塑料粒子有更大的迁移范围。西沿岸区输入的微塑料粒子首先沿西岸向北漂移,绝大部分进入竺山湖环流,最终归趋于竺山湖内部;另一部从竺山湖环流中迁移出,进入湖心区。目前太湖西岸正在致力打造太湖河道生态长廊,生态修复措施会影响入湖口附近的水动力条件,水动力条件的改变将影响微塑料的迁移规律^[32]。南沿岸区输入的微塑料粒子受到3股主体湖流的影响,一部分从出口沿西岸向北,路径与PX3输入的微塑料粒子相似;一部分从出口直接向北进入湖心区,达到梅梁湖;另一部分从出口向东漂移,经过东太湖、胥湖、漫山湖,一小部分进入梅梁湖和贡湖。PN所在地区为长兜港,长兜港是东、西苕溪防洪工程的重要组成部分,东、西苕溪汇流最末端复杂的流场使微塑料等污染物的迁移路径不尽相同^[33]。

可以看出,湖湾是太湖微塑料主要归趋位置,来自湖湾输入源的微塑料粒子绝大多数归趋于湖湾内部,而西、南沿岸区输入的微塑料粒子随太湖大环流漂移后,也有一定概率进入湖湾小环流而最终归趋于湖湾。王晶等^[34]在研究海洋输入源微塑料输运过程中提出海洋动力条件是微塑料输运的主要影响因素,输入源位置、湖流是太湖微塑料迁移过程的重要因素。

3.4.2 太湖微塑料污染概率分布

太湖微塑料污染概率分布与输入源微塑料归趋结果及输入源微塑料负荷通量有关,归趋粒子多且对应输入负荷高的湖区,其污染概率值也较高。太湖微塑料污染概率整体呈现“北高南低、西高东低”的分布特征。这与Zhang等^[18]在太湖调查的微塑料分布特征结论一致。太湖西岸地区属于平原地区,人口密集,工农业发达^[35],污染负荷较大^[36],微塑料入湖通量较高。竺山湖是整个太湖中最易受微塑料污染的湖区,污染主要来自竺山湖自身输入源和西沿岸区输入源。由于PZ、PX1输入源微塑料负荷通量占6个输入源总量的87.2%,因此,竺山湖微塑料污染概率显著高于其他湖区。竺山湖附近作为太湖周边人类活动最密集的区域^[37],在微塑料污染防控方面应避免自身湖区的微塑料污染排放,也要防止外部湖区的微塑料入侵。西沿岸区也比较容

易受微塑料污染,微塑料污染主要来自西沿岸区3个输入源和南沿岸区输入源。北部贡湖、梅梁湖两个湖湾污染概率值较为接近,贡湖微塑料污染主要来自PG输入源,研究表明外源负荷等易在河流入湖口聚集^[38-39],因此污染防治重心应放在自身湖区微塑料输入上,特别重视入湖口微塑料污染;梅梁湖本身无输入源,其微塑料污染主要来自PZ输入源和西沿岸区3个输入源。南沿岸区输入源为南沿岸区、湖心区、太湖东部湖区的微塑料污染来源,此地区污水排放量大^[40-41],今后应严格控制微塑料入湖。

综上,竺山湖和西沿岸区是太湖微塑料污染防治的重要湖区,且输入源PZ和PX1是污染的主要来源,微塑料污染受湖流影响下的归趋和输入源微塑料负荷的双重影响。通过对微塑料污染概率的评估,确定易被微塑料污染的湖区,有助于对太湖微塑料污染的治理;而对相应输入源进行微塑料输入控制,能够降低湖区微塑料污染风险。

4 结 论

a. 微塑料输入源的位置和附近的湖流是微塑料迁移的主要影响因素。湖湾(竺山湖、贡湖)内输入源受到湾内环流影响,微塑料粒子绝大部分在湖湾内部漂移;太湖西沿岸区输入源受到太湖大环流影响,微塑料粒子大部分沿西岸向北迁移至竺山湖;南沿岸区输入源同时受3股湖流影响,大部分沿着从南向北湖流进入湖心区。

b. 湖湾是太湖微塑料的主要归趋位置,竺山湖和贡湖除了受纳自身输入源的微塑料粒子,还受纳来自西、南沿岸区的微塑料粒子。而梅梁湖在无输入源的情况下,主要接受来自竺山湖、西沿岸区、南沿岸区的微塑料粒子。

c. 太湖微塑料污染概率分布由微塑料归趋结果和输入源负荷通量决定。竺山湖是太湖微塑料污染概率最高的湖区,微塑料污染主要来自湖湾自身输入源和西沿岸区输入源;西沿岸区微塑料污染概率次之,其微塑料污染主要来自西沿岸区自身输入源和南沿岸区输入源。

d. 竺山湖和西沿岸区是太湖微塑料污染风险防控的重要湖区,两个湖区的微塑料污染概率和输入负荷最高。因此,应采取相应的微塑料输入源防控和湖区微塑料治理措施,以减轻太湖微塑料污染。

参考文献:

[1] 孙凯. 全球海洋塑料污染问题及治理对策[J]. 国家治理, 2021(15): 5. (SUN Kai. Global marine plastic pollution problems and countermeasures[J]. Governance,

2021(15):5. (in Chinese))

- [2] YE Shujing, CHENG Min, ZENG Guangming, et al. Insights into catalytic removal and separation of attached metals from natural-aged microplastics by magnetic biochar activating oxidation process[J]. Water Research, 2020,179:115876.
- [3] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672):838-838.
- [4] 包旭辉, 闫振华, 陆光华. 我国淡水中微塑料的污染现状及生物效应研究[J]. 水资源保护, 2019, 35(6):115-123. (BAO Xuhui, YAN Zhenhua, LU Guanghua. Study on pollution status and biological effect of microplastics in fresh water of China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):115-123. (in Chinese)).
- [5] TEUTEN E L, ROWLAND S J, GALLOWAY T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(22):7759-7764.
- [6] 熊雄, 吴辰熙. 湖泊: 内陆水体微塑料污染的热点区域[J]. 自然杂志, 2021, 43(4):243-250. (XIONG Xiong, WU Chenxi. Lakes: hotspots of microplastic pollution in inland water bodies[J]. Chinese Journal of Nature, 2021, 43(4):243-250. (in Chinese)).
- [7] DING Ling, MAO Ruofan, GUO Xuetao, et al. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 667:427-434.
- [8] LI Jingyi, LIU Huihui, CHEN J P. Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection[J]. Water Research, 2018, 137:362-374.
- [9] LEBRETON L C M, VAN DER ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans[J]. Nature Communications, 2017, 8:15611.
- [10] SCHMIDT C, KRAUTH T, WAGNER S. Export of plastic debris by rivers into the sea[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(21):12246-12253.
- [11] SIEGFRIED M, KOELMANS A A, BESSELING E, et al. Export of microplastics from land to sea: a modelling approach[J]. Water Research, 2017, 127:249-257.
- [12] 杜云彬, 陈求稳, 王智源, 等. 江苏省典型湖泊饮用水源地安全综合评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(5):71-78. (DU Yunbin, CHEN Qiwen, WANG Zhiyuan, et al. Safety evaluation of typical lake drinking water sources in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):71-78. (in Chinese)).
- [13] ERIKSEN M, MASON S, WILSON S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77(1/2):177-182.
- [14] ANDERSON P J, WARRACK S, LANGEN V, et al.

- Microplastic contamination in lake Winnipeg, Canada[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 223-231.
- [15] YUAN Wenke, LIU Xiaoning, WANG Wenfeng, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 170: 180-187.
- [16] WANG Zhichao, QIN Yiming, LI Weiping, et al. Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China [J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17 (4): 1821-1830.
- [17] XIONG Xiong, ZHANG Kai, CHEN Xianchuan, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake-Qinghai Lake [J]. Environmental Pollution, 2018, 235: 899-906.
- [18] ZHANG Qiji, LIU Tong, LIU Liu, et al. Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148745.
- [19] SU Lei, XUE Yingang, LI Lingyun, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711-719.
- [20] 王许琨, 徐艳东, 娄琦, 等. 海洋微塑料输运过程数值模拟研究进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43 (2): 74-81. (WANG Xukun, XU Yandong, LOU Qi, et al. Progress in numerical simulation of marine microplastic transport [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43 (2): 74-81. (in Chinese))
- [21] VAN WIJNEN J, RAGAS A M J, KROEZE C. Modelling global river export of microplastics to the marine environment: sources and future trends [J]. Science of the Total Environment, 2019, 673: 392-401.
- [22] LI Yanfang, WOLANSKI E, DAI Zhengfei, et al. Trapping of plastics in semi-enclosed seas: insights from the Bohai Sea, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137: 509-517.
- [23] ONINK V, WICHMANN D, DELANDMETER P, et al. The role of Ekman currents, geostrophy, and stokes drift in the accumulation of floating microplastic [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124 (3): 1474-1490.
- [24] 侯俊, 许晓雅, 程芳, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用及环境行为研究进展 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (1): 22-28. (HOU Jun, XU Xiaoya, CHENG Fang, et al. Research progress on interaction and environment behavior between microplastics and organic pollutants [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (1): 22-28. (in Chinese))
- [25] REISSER J, SLAT B, NOBLE K, et al. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre [J]. Biogeosciences, 2015, 12 (4): 1249-1256.
- [26] HARDESTY B D, HARARI J, ISOBE A, et al. Using numerical model simulations to improve the understanding of micro-plastic distribution and pathways in the marine environment [J]. Frontiers in Marine Science, 2017, 4: 30.
- [27] 钟晶晶, 刘茂松, 王玉, 等. 太湖流域河流与湖泊间主要水质指标的空间关联特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (8): 2176-2182. (ZHONG Jingjing, LIU Maosong, WANG Yu, et al. Spatial correlation of major water quality indices between the lake and rivers in Taihu Lake Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33 (8): 2176-2182. (in Chinese))
- [28] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] WANG Yulin, WANG Liang, CHENG Jijin, et al. Recognizing crucial aquatic factors influencing greenhouse gas emissions in the eutrophication zone of Taihu Lake, China [J]. Sustainability, 2019, 11 (19): 5160.
- [30] QIN Boqiang, PAERL H W, BROOKES J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts [J]. Science Bulletin, 2019, 64 (6): 354-356.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水功能区划分标准: GB/T 50594—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [32] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18 (5): 439-445. (ZHU Guangwei. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18 (5): 439-445. (in Chinese))
- [33] 丁文浩, 李云, 徐世凯, 等. 变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (6): 58-65. (DING Wenhao, LI Yun, XU Shikai, et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (6): 58-65. (in Chinese))
- [34] 王晶, 赵骞, 邢传玺. 渤海微塑料输运过程的数值模拟研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43 (2): 58-66. (WANG Jing, ZHAO Qian, XING Chuanxi. Numerical study on transport process of microplastics in the Bohai Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43 (2): 58-66. (in Chinese))
- [35] 李勇, 单雅洁, 李娜, 等. 太湖潜流带有机质含量对硝酸盐还原途径的影响 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (1): 44-51. (LI Yong, SHAN Yajie, LI Na, et al. Effects of organic matter content on nitrate reduction pathway in the hyporheic zone of Lake Taihu [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (1): 44-51. (in Chinese))
- [36] 朱伟, 许小格, 侯豪, 等. 水库环保疏浚及板框脱水工程中余水水质及变化规律 [J]. 湖泊科学, 2022, 34 (2): 468-477. (ZHU Wei, XU Xiaoge, HOU Hao, et al. Water

- quality and change pattern of residual water in reservoir environmental dredging and plate and frame dewatering project[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 468-477. (in Chinese))
- [37] 陆昊, 杨柳燕, 杨明月, 等. 太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 174-181. (LU Hao, YANG Liuyan, YANG Mingyue, et al. Influence of rainfall in upper reaches of the Taihu Basin on inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 174-181. (in Chinese))
- [38] 王亚宁, 徐明, 许静波, 等. 里下河腹部地区典型湖泊浮游动物演替特征及水质评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 49-57. (WANG Yaning, XU Ming, XU Jingbo, et al. Zooplankton succession characteristics and water quality evaluation of typical lakes in the hinterland of Lixia River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 49-57. (in Chinese))
- [39] 王璇, 牛司平, 宋小龙, 等. 城市湖泊沉积物微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2020, 41(7): 3240-3248. (WANG Xuan, NIU Siping, SONG Xiaolong, et al. Characterization of microplastic pollution of sediments from urban lakes [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3240-3248. (in Chinese))
- [40] 潘鑫, 杨子, 杨英宝, 等. 基于高分六号卫星遥感影像的太湖叶绿素 a 质量浓度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 50-56. (PAN Xin, YANG Zi, YANG Yingbao, et al. Mass concentration inversion analysis of chlorophyll a in Taihu Lake based on GF-6 satellite data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 50-56. (in Chinese))
- [41] 查阳. 太湖流域农业面源污染控制技术评估及微塑料污染赋存特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022. (收稿日期: 2023-01-08 编辑: 施业)

(上接第 151 页)

- [22] 马于航, 索梅芹. 基于 GA-BP 神经网络与正态区间估计的需水预测: 以邯郸市为例[J]. 中国农村水利水电, 2022(3): 19-24. (MA Yuhang, SUO Meiqin. Research on water demand forecasting in handan city based on GA-BP Neural network and normal interval estimation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(3): 19-24. (in Chinese))
- [23] 张家口市水文局. 河北省张家口市水资源评价报告[R]. 张家口: 张家口市水文局, 2005.
- [24] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(4): 100-110.
- [25] DENG Yi, XING Chengyue, XIE Xiaodan, et al. The comprehensive study of the urbanization development and environmental damage response mechanism [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2022, 36: 100782.
- [26] 牛欣怡, 鲁程鹏, 卢佳赞, 等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun. et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 74-82. (in Chinese)) (收稿日期: 2022-11-14 编辑: 彭桃英)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊, 针对我国水资源短缺、水污染严重、水环境恶化等突出问题, 探讨水资源保护工作中的基础研究、宏观管理及水环境治理、水生态修复等问题, 主要栏目有“特约专家论坛”“水资源”“水环境”“水生态”等。

《水资源保护》1985 年创刊, 经过 30 多年的努力, 《水资源保护》办刊成绩斐然, 目前是美国《工程索引》(EI) 收录期刊、中国科学引文数据库(CSCD) 来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国权威学术期刊、中国精品科技期刊、中国高校百佳科技期刊、华东地区优秀期刊, 同时被荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、波兰《哥白尼索引》(IC) 等数据库收录。

《水资源保护》一直以来都是水利界和环保界备受关注的重点期刊, 是国内较有影响的水利期刊之一, 主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科技人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊, 30 元/册, 全年共计 180 元, 每逢单月 20 日出版。邮发代号: 28-298。

地址: 210098 南京市西康路 1 号 电话: (025) 83786642

电子邮箱: bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn