

生菜在鱼菜共生立体种养殖系统中的水质净化效果

魏东¹, 张植元², 胡佳祥², 谷兵¹, 范泽³, 王雄廷², 陈娇²

(1.天津农学院水产学院,天津市水产生态及养殖重点实验室,天津 300384;2.四川水利职业技术学院,四川成都 611200;3.中国水产科学研究院黑龙江水产研究所,黑龙江省水生动物病害与免疫重点实验室,黑龙江哈尔滨 150070)

摘要 [目的]探讨鱼菜共生立体种养殖系统的建立。[方法]暂养结束后挑选健康规格较为一致的锦鲤幼鱼[初始体重为(55.73±3.55)g]作为试验鱼。试验设对照组和试验组。对照组不种植蔬菜,试验组为待蔬菜幼苗长出4片真叶后挑选健壮且高度基本一致的生菜幼苗移植到上述装置中。每组设置3个重复,每重复20尾鱼,试验组分别种植生菜15颗。试验周期60 d。[结果]在整个试验周期中,除个别天数外,对照组氨氮、硝酸态氮、总氮、总磷浓度与试验组间差异显著($P<0.05$),且试验组总体低于对照组。[结论]鱼菜共生立体种养殖系统对氨氮、硝酸态氮、总磷、总氮具有较好的净化效果。

关键词 鱼菜共生;立体种养殖;生态共生效应

中图分类号 S969.39 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)16-0152-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.16.039

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Water Purification Effect of Lettuce in the Vertical Aquaponics System**WEI Dong¹, ZHANG Zhi-yuan², HU Jia-xiang² et al (1.Department of Fishery Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin Key Laboratory of Aquatic Ecology and Aquaculture, Tianjin 300384; 2.Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu, Sichuan 611200)

Abstract [Objective] In order to explore the establishment of a vertical aquaponics system. [Method] The healthy juvenile koi (*Cyprinus carpio*) (initial body weight 55.73±3.55 g) after the end of temporary culture were selected as experimental fish. The control group and experimental group were set up. The vegetables were cultivated in the control group, while the 15 vegetables, which has four true leaves, were cultivated in the experimental group. There were 3 replicates in each group and 20 fish in each replicate. The experimental cycles were 60 days. [Result] The results showed that except for a few days, there was significant difference in the concentrations of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen and total phosphorus between the control group and experimental group ($P<0.05$), and the test group was generally lower than that in the control group. [Conclusion] The vertical aquaponics system has good purification effect on ammonia nitrogen, nitric acid attitude, total phosphorus and total nitrogen.

Key words Aquaponics; Vertical system; Ecological symbiosis effect

鱼菜共生起源于古代中国的稻田养鱼技术,是一种新型的复合耕作体系,它把循环水养殖与无土栽培2种技术结合起来,通过巧妙的生态设计达到科学的协同共生,从而实现“养鱼不换水而无水质忧患,种菜不施肥而正常成长”的生态共生效应。20世纪80年代美国马克·莫特瑞等科学家完成了鱼菜共生的理论工作^[1];80年代末期美国维尔京群岛大学詹姆斯·瓦克斯博士成功研发了世界上第一套鱼菜共生UVI模式^[2];我国学者张明华等^[3]建立了我国第一套鱼菜共生系统,并通过了中国科学技术发展基金会和中国水产学会组织的技术鉴定。

目前,对于鱼菜共生的研究主要集中在系统构造方面^[4-6],现有的鱼菜共生种植系统设计都采用先将养殖用水过滤分解后再提供给植物利用,机械地将营养物质的分解环节和植物种植环节分开,不仅增加了用地面积,还会使植物出现缺素的症状。有关鱼菜共生理论方面的研究还显得不足,虽然目前已有大量关于鱼菜共生系统的报道,但是机理不够系统深入,有待进一步深入研究和完善,尤其是需要另寻思路建立鱼与菜既共生又相互促进的生态机制。

笔者利用生态学原理^[7-9]设计并建立了一种鱼菜共生立体种养殖体系,通过建立植物与微生物之间的协同共生关系^[10-12],探索如何更加高效地利用养殖废水中的营养物质,实现养鱼不换水、种菜不施肥,为开发利用鱼菜共生立体种

养殖系统奠定实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验系统 该鱼菜共生立体种养殖系统,包括养殖模块、蓄水模块、立柱种植模块、平面浮筏种植模块、水循环装置。养殖模块由养殖池和收集池组成,养殖池底部朝中央向下倾斜,形成漏斗式的底面,养殖池和收集池的底部和上部分别由管道联通,使养殖池和收集池形成一个“U”形的联通器。蓄水模块为安装有虹吸结构和溢流的高位蓄水池,收集池中的水经水泵至蓄水池中,水位上升到虹吸控制的最高水位时就会触发虹吸的启动,在水压的作用下形成强大的水流,再被循环管道分流到立体种植装置中。立体种植模块为若干中通的管道结构组成的立体种植装置,管道结构的外壁四周沿竖直方向设置有4列种植孔,相邻的2列种植孔之间呈交错拍列,种植孔贯穿管壁并且开口倾斜向上,每个种植孔上配有1个种植篮,用于固定所栽培植物。平面浮筏种植模块由若干深水浮筏栽培床构成,栽培床的出水口设置为溢流结构;与传统UVI栽培模式有所不同的是^[4,13-14],在该系统中流入栽培床的养殖用水不经过滤且浮板的宽度宽于栽培床的宽度,使浮板放于栽培床时能够架在栽培床的两端,从而使浮板能够高于栽培床的最高水位,以便在浮板与栽培床水面之间留一层空气层。水循环装置由水泵及循环管道组成。

蓄水模块、立柱种植模块、平面浮筏种植模块、养殖模块在竖直方向分别按上层、中层、下层、底层呈4层分布;循环

管道将养殖模块、蓄水模块、立体种植模块、平面浮筏种植模块依次连接。该系统的水循环路线为养殖模块→蓄水模块→立柱种植模块→平面浮筏种植模块→养殖模块。养殖用水不经过过滤,直接经水泵从收集池提升至蓄水池,再由蓄水池输送到各立柱种植装置中,经立柱种植装置进行第 1 步过滤吸收后再输送到栽培床进一步过滤吸收,最后由循环管道导流回养殖池,形成一个闭合循环(图 1)。

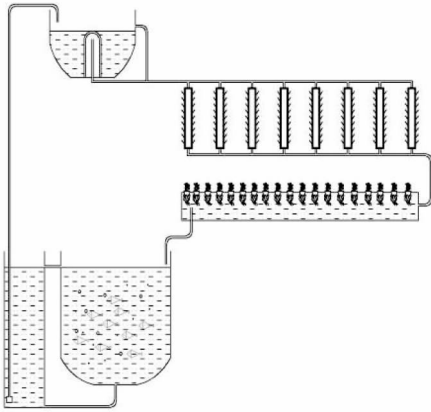


图 1 一种鱼菜共生立体种养系统
Fig.1 A vertical aquaponics system

1.2 试验材料 试验所用蔬菜为天津农学院蔬菜研究中心同期培育的生菜幼苗,试验前待幼苗长出 4 片真叶时,再将幼苗移植到立柱式种植装置中。试验用鱼为天津市蓝科水产养殖公司同期繁殖的锦鲤鱼苗,试验前进行消毒处理,并置于周转箱(0.8 m×0.6 m×0.4 m)中暂养 7 d,期间不投喂饲料。

试验饲料配方组成:鱼粉 8%、豆粕 22%、菜籽粕 13%、棉粕 16%、面粉 13%、玉米蛋白粉 9%、全虾粉 8%、啤酒酵母 3%、豆油 2%、预混料 4%、羧甲基纤维素 2%;试验饲料营养水平:粗蛋白质 38.6%,粗脂肪 5.2%,总能量 12.27 MJ/kg。各饲料原料均通过粉碎机粉碎过 60 目网筛,混合均匀后,使用江苏牧羊集团牧羊 MUZLM V4 型饲料制粒机制成直径为 1.00 mm 的沉性颗粒饲料。

1.3 试验分组及管理 试验在天津农学院水生观赏动物养殖实验室进行。暂养期结束后挑选健康规格较为一致的个体[初始体重为(55.73±3.55)g]作为试验用鱼。试验设对照组和试验组,每组设 3 个重复,每重复投放 20 尾鱼,对照组不种植蔬菜,试验组每个重复分别种植生菜 15 颗。

试验周期 60 d,试验期间均采用固定投饲率的方法进行投喂,投饲率为 3%/d。养殖池设置有水位刻度线,整个系统在试验期间无需换水,只需每天往养殖池添加少量水到刻度线,以补充被蔬菜吸收和蒸发的水分。试验期间每 4 d 取样一次,测定系统养殖水体的氨氮、硝酸态氮、总磷、总氮的含量。

1.4 试验方法

1.4.1 氨氮、硝酸态氮及总磷、总氮的测定。氨氮、硝酸态氮及总氮、总磷的测定方法参考养殖水环境化学书^[14-15]。

1.4.2 标准曲线的制作。氨氮、硝酸态氮及总氮、总磷标准

曲线(图 2~5)的制作参考文献[14-15]。

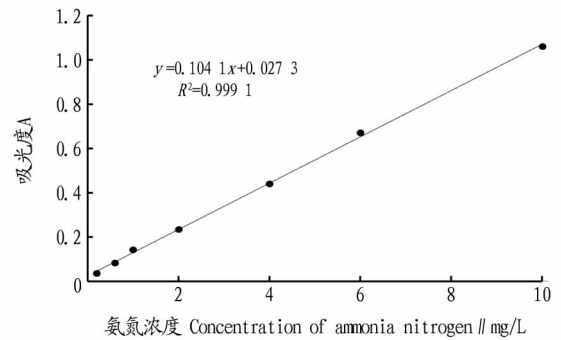


图 2 氨氮标准曲线

Fig.2 Standard curve of ammonia nitrogen

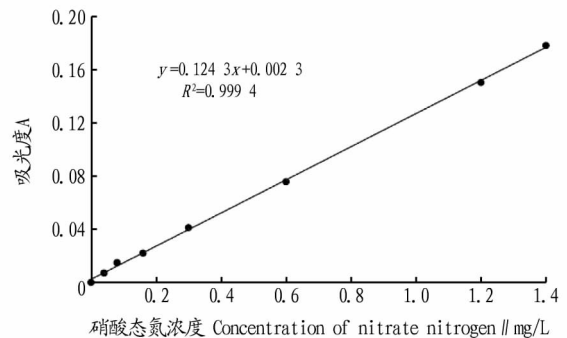


图 3 硝酸态氮标准曲线

Fig.3 Standard curve of nitrate nitrogen

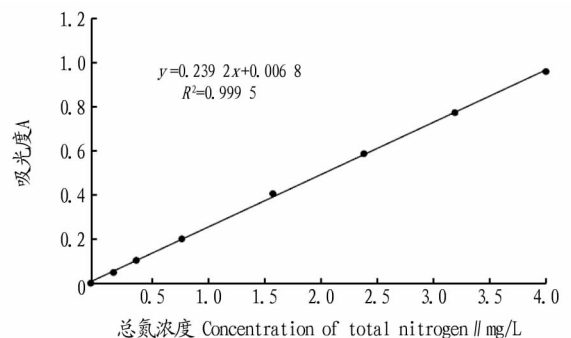


图 4 总氮标准曲线

Fig.4 Standard curve of total nitrogen

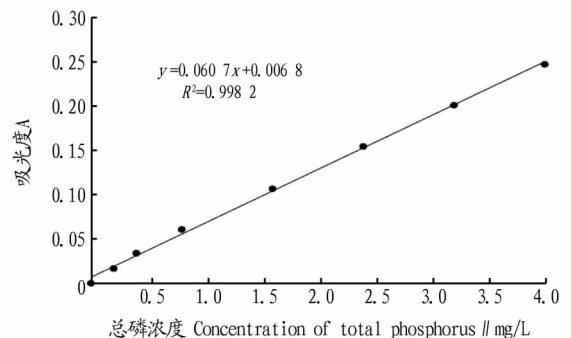


图 5 总磷标准曲线

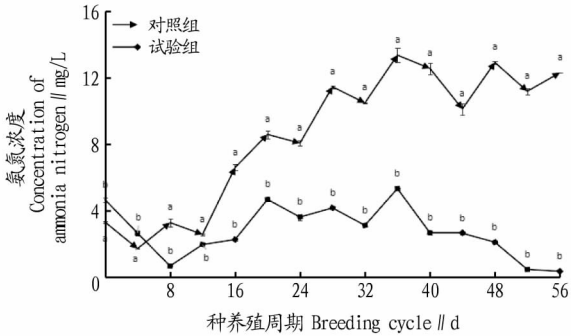
Fig.5 Standard curve of total phosphorus

1.5 数据统计 所有数据均以平均值±标准差表示,并利用 SPSS 18.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),若差异达到显著水平($P<0.05$),则进行 Duncan's 法多

重比较。

2 结果与分析

2.1 试验系统中微生物群落的形成与硝化系统的建立 由图6可知,在整个试验周期中对照组和试验组氨氮浓度差异显著($P<0.05$),其中对照组氨氮浓度在第0天到第36天浓度逐渐升高,在第36天氨氮浓度达到最高值,第36天到第56天氨氮浓度基本维持在平稳水平;试验组氨氮浓度在第0天到第20天先降低再升高,第36天时氨氮浓度达到最高值,第36天之后氨氮浓度逐渐降低。

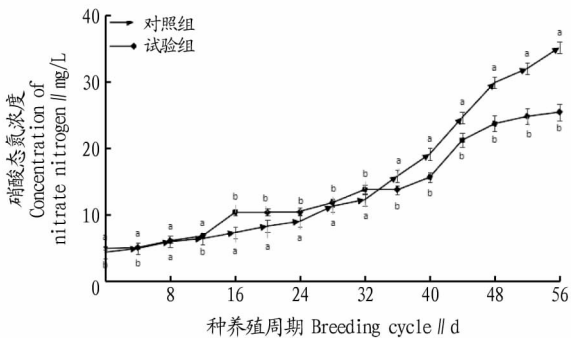


注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatment ($P<0.05$)

图6 养殖水体中氨氮浓度变化曲线

Fig.6 Variation curve of ammonia nitrogen concentration in aquaculture water

由图7可知,整个试验周期中除了第8天,对照组和试验组硝酸态氮浓度差异显著($P<0.05$),对照组和试验组硝酸态氮浓度均缓慢升高,其中,在第12天到第32天试验组硝酸态氮浓度显著高于对照组($P<0.05$),第36天到第56天对照组硝酸态氮浓度显著高于试验组($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatment ($P<0.05$)

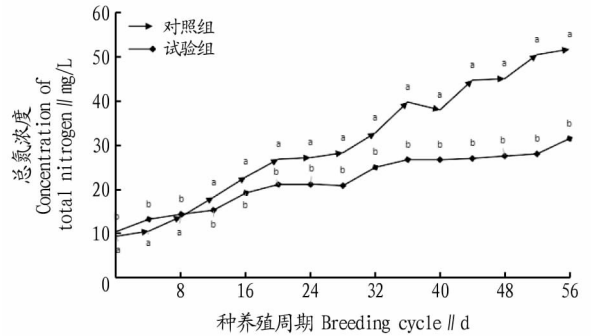
图7 养殖水体中硝酸态氮浓度变化曲线

Fig.7 Variation curve of nitrate nitrogen concentration in aquaculture water

2.2 试验系统对总氮、总磷的净化效果 由图8可知,在整个试验周期中,对照组和试验组总氮浓度差异显著($P<0.05$),对照组和试验组总氮浓度变化趋势明显,均有不同程度的升高,其中第0天到第8天试验组总氮浓度显著高于对照组($P<0.05$),第9天到第56天对照组总氮浓度显著高于

试验组($P<0.05$)。

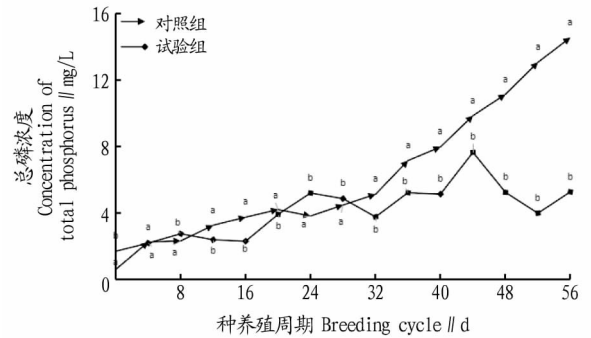
由图9可知,在整个试验周期中,对照组和试验组总磷浓度变化趋势明显,除第4天外,对照组和试验组总磷差异显著($P<0.05$),其中对照组总磷浓度在第0天到第56天浓度逐渐升高;试验组总磷浓度在第0天到第32天浓度呈波动式上升,第32天到第56天总磷浓度基本维持在同一水平。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatment ($P<0.05$)

图8 养殖水体中总氮浓度变化曲线

Fig.8 Variation curve of total nitrogen concentration in aquaculture water



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatment ($P<0.05$)

图9 养殖水体中总磷浓度变化曲线

Fig.9 Variation curve of total phosphorus concentration in aquaculture water

3 讨论

该试验在前期的研究基础上,利用生态学原理设计并建立了一种鱼菜共生立体种养殖系统,其中,养殖模块和蓄水模块通过循环管道连接,管道的一侧连上水泵放入收集池的底部,另一侧接入蓄水池。系统运行时养殖用水经养殖池在压力的作用下将池底的脏物汇集到收集池中,再由水泵经管道抽提到蓄水池中。

该系统中蓄水模块为安装有虹吸结构和溢流的高位蓄水池。常用的虹吸结构有钟罩式虹吸、倒“U”型虹吸等,其原理都是先将虹吸管内的气体排出,在虹吸管内部形成真空,在外部大气压和虹吸管内部负压的作用下高位管口的水被吸进最高点,从而使水源不断地流入低位容器,随着水位下降至虹吸管控制的最低水位,虹吸管底部进入空气,虹

吸断开,等水位再次上升到高位管口时虹吸会再次启动,两次虹吸之间间隔一段时间。蓄水池中的水被分流到立柱种植装置时需要有较大的水压,虹吸结构能够将蓄水池中的水位控制在某一个特定高度,达到暂时储存养殖用水以形成水压的作用,同时虹吸的间断供水还会给基质中带来更多的氧气。系统运行时,收集池中的水不经过滤直接由水泵提升至蓄水池中,水位上升到虹吸控制的最高水位时就会触发虹吸的启动,在水压的作用下形成强大的水流,再被循环管道分流到立体种植装置中。

一直以来,受传统的鱼菜共生系统研究方法的限定,在鱼菜共生系统中植物根系和微生物的关系被大大低估^[16]。在进行鱼菜共生系统的构建时,通常先将养殖用水过滤,这样水体中大部分有机物质被过滤掉,然而这部分物质在构建植物与微生物之间的关系时起着重要作用^[16]。在该试验系统中,立体种植模块为中通的管道结构,管道结构的外壁四周沿竖直方向设置4列种植孔,相邻的2列种植孔之间呈交错排列,种植孔贯穿管壁且开口倾斜向上,每个种植孔上配有一个种植篮,用于固定所栽培植物。管道结构内部沿着内壁固定至少一圈生化过滤棉,使生化过滤棉与管道形成管中套管的中通结构,生化过滤棉用于过滤养殖用水以培养微生物群落,同时植物的根系穿过种植篮依附在生化过滤棉上,与微生物群落之间形成局部的小生态。在鱼菜共生的系统中植物所需营养物质除C、H、O 3种营养元素来自水和二氧化碳外,其他矿质元素都来源于残饵粪便的分解,与无机营养液不同的是,有机物分解为植物所需的营养物质是一个漫长的过程,而且需要多种微生物的参与。在有机物质的氧化分解过程中起主要作用的是异养需氧和自养需氧型细菌以及一些真菌类,它们在这个过程中扮演着重要角色,它们在整个系统中耗氧量最大。立体种植装置充分利用了空间位置,实现了单位的最大可种植面积,中通的结构有利于水分和空气的流通,为需氧微生物和植物根系提供了充足的氧气。另外,与无机营养液的不同之处在于鱼菜共生系统中营养物质的供应方式;以铁营养的供应为例^[16-17],能被植物直接利用的有效铁源为 Fe^{2+} ,在pH接近中性和氧气充足的条件下,水体中有效铁源的浓度几乎为0,而无机营养液采用了螯合铁的形式为植物提供铁源,避免了铁的氧化沉淀作用,因此在无机营养液中有有效铁的含量很高;鱼菜共生系统中铁的来源需要借助微生物的作用,对于双子叶和非禾本科的植物来说,在缺铁胁迫下植物的根系会分泌大量物质,这些物质有利于根部环境中分泌高铁载体微生物群落的生长,而抑制了其他微生物的生长,同时植物的根系分泌物能给这类微生物提供碳源,两者之间各取所需。

该试验系统中立体种植模块与平面浮筏种植模块由循环管道连接,在立柱种植管道下方安装有回水收集管,养殖用水经过立柱种植模块的过滤吸收后被再次汇入平面浮筏种植模块进行下一步过滤吸收。在鱼菜共生系统中,植物、种植基质和微生物是一个连续的整体,三者之间具有很强的依赖性^[16]。微生物与鱼菜共生系统中有机物的矿化关系密

切,在参与鱼菜共生系统有机物分解的过程中,同化系统中有机质和矿质盐分养分。微生物固持的这些养分在其死亡后又可以作为有机物质再被矿化为矿质养分,是系统中矿质养分的源和库^[12-18]。该试验系统中,平面浮筏种植模块由若干深水浮筏栽培床构成,栽培床的出水口设置为溢流结构,溢流结构的设置能够维持栽培床的水位在某一高度,并将循环水体中的残渣都截留在栽培床的底部形成腐殖质层,腐殖质中包含有许多不同种类的微生物,在稳定水质方面起着重要作用,同时腐殖质作为水体中营养元素的储存库能给栽培的浮床植物提供营养物质。

该试验系统中,浮板的宽度宽于栽培床宽度,使浮板放于栽培床时能够架在栽培床的两端,从而使浮板能够高于栽培床最高水位,以便在浮板与栽培床水面之间留一层空气层,空气层的设置增加了水面与空气的接触面积,同时还能给植物根系提供氧气。随着植物根系不断拓展,根系展开提供的巨大表面积又给微生物的生长提供了附着面,植物也能依靠微生物得到需要的营养物质,通过植物与微生物之间的这种协调共生作用达到了鱼、植物、微生物的协同共生。相关研究表明,植物对污染物的去除作用主要通过植物的对污染物的吸收、吸附及富集作用,然而,根际微生物对污染的净化方面起着更加重要的作用^[19-21]。

4 结论

该试验利用生态学原理设计并建立了一种鱼菜共生立体种养系统,通过建立植物与微生物之间的互利共生关系,调整植物根际微生物的群落结构朝着有利于植物生长的结构发展,从而更加有效地利用养殖废水中的营养物质。试验研究结果表明,该系统对氨氮、硝酸态氮、总磷、总氮具有较好的净化效果。

参考文献

- [1] 林环.一位外国人的“鱼菜共生革命”[N].解放日报,2013-02-26(006).
- [2] 萧蕾,洪彦.都市农业新技术鱼菜共生系统及其立体化案例研究[J].风景园林,2014(4):117-120.
- [3] 张明华,丁永良,杨蓉,等.鱼菜共生技术及系统工程研究[J].现代渔业信息,2004,19(4):7-12.
- [4] 王焕,高文峰,侯同玉,等.鱼菜共生浮排种类及制作工艺[J].现代农业科技,2016(8):183-185.
- [5] 王雅敏.鱼菜共生系统的研究及其开发(上)[J].渔业机械仪器,1991,18(5):2-4.
- [6] 何明云.鱼菜共生系统综合养种技术研究报告摘要[J].渔业机械仪器,1994,21(5):12-15.
- [7] 金崇伟.机理I植物缺铁响应机制和信号调控途径[D].杭州:浙江大学,2008.
- [8] 盛江梅,吴小芹.菌根真菌与植物根际微生物互作关系研究[J].西北林学院学报,2007,22(5):104-108,135.
- [9] 蒋婧,宋明华.植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J].植物生态学报,2010,34(8):979-988.
- [10] 王元贞,潘廷国,柯玉琴.微生物与植物共生关系的研究及其利用[J].中国生态农业学报,2003,11(3):95-98.
- [11] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [12] 叶协锋,张友杰,鲁喜梅,等.土壤微生物与土壤营养关系研究进展[J].土壤通报,2010,41(1):237-241.
- [13] 张丽萍,梅明森,程加丽,等.人工浮岛栽培蔬菜及花卉对水质的净化作用研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2008,30(1):93-96.
- [14] 雷衍之.养殖水环境化学[M].北京:中国农业出版社,2004.
- [15] 雷衍之.养殖水环境化学实验[M].北京:中国农业出版社,2006.

模型(吴素业、郑海金等和史东梅等模型)的结果。

(2)在喀斯特地区的 10 个站点中,有 6 个站点模型 B (CREAMS 模型)的稳定性较好,具有较大的有效系数和较小

的相对偏差,表明基于日降雨量的模型 B 在喀斯特地区较为适用;当仅有月降雨量资料时,宜采用模型 D(郑海金等模型)。

表 2 非喀斯特地区各观测站不同降雨侵蚀力模型有效系数(E_f)和相对偏差(E_r)

Table 2 Effective coefficient (E_f) and relative deviation (E_r) of different rainfall erosivity models for different observation stations in the karst area

观测站 Observation station	模型 A Model A		模型 B Model B		模型 C Model C		模型 D Model D		模型 E Model E	
	E_f	E_r	E_f	E_r	E_f	E_r	E_f	E_r	E_f	E_r
蒙山 Mengshan	0.424	0.328	0.577	0.060	0.897	0.059	0.840	0.102	0.007	0.430
贺州 Hezhou	0.543	0.285	0.722	0.174	0.547	0.042	0.954	0.001	-0.046	0.501
百色 Baise	0.462	0.356	0.622	0.280	0.591	0.212	0.968	0.035	0.085	0.388
田东 Tiandong	0.325	0.351	0.445	0.292	0.449	0.199	0.964	0.025	-0.011	0.420
桂平 Guiping	0.529	0.288	0.611	0.256	0.839	0.113	0.958	0.046	-0.040	0.477
梧州 Wuzhou	0.406	0.329	0.599	0.235	0.624	0.153	0.960	0.032	0.014	0.443
南宁 Nanning	0.226	0.462	0.610	0.237	0.576	0.208	0.964	0.041	0.031	0.450
灵山 Lingshan	0.618	0.250	0.649	0.294	0.870	0.126	0.987	0.018	0.063	0.436
玉林 Yulin	0.551	0.292	0.638	0.272	0.829	0.131	0.981	0.027	-0.011	0.460
东兴 Dongxing	0.800	0.081	0.481	0.374	0.963	0.028	0.966	0.043	0.034	0.470
钦州 Qinzhou	0.620	0.148	0.440	0.331	0.909	0.075	0.971	0.027	0.078	0.431
北海 Beihai	0.730	0.155	0.511	0.417	0.840	0.142	0.975	0.035	0.135	0.395
涠洲岛 Weizhou Island	0.690	0.219	0.515	0.435	0.755	0.195	0.953	0.071	0.187	0.388

(3)在非喀斯特地区的 13 个站点中,有 12 个站点模型 D(郑海金等模型)稳定性较好,具有较大的有效系数(平均值为 0.967)和较小的相对偏差(平均值为 0.033),表明基于月降雨量的郑海金等模型在非喀斯特地区较为适用。

参考文献

- [1] BEGUERÍA S, SERRANO-NOTIVOLI R, TOMAS-BURGUERA M, et al. Computation of rainfall erosivity from daily precipitation amounts[J]. Science of the total environment, 2018, 637/638:359-373.
- [2] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6):705-711.
- [3] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究, 2013, 32(2):245-256.
- [4] 马良, 姜广辉, 左长清, 等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10):61-68.
- [5] 何绍浪, 郭小君, 李凤英, 等. 中国南方地区近 60a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9):1406-1416.
- [6] 史志华, 郭国先, 曾之俊, 等. 武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究[J]. 中国水土保持, 2006(1):22-24.
- [7] 陈正发, 史东梅, 何伟, 等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10):209-219.
- [8] 王超. 四川省降雨侵蚀力时空分布特征分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(2):111-114.
- [9] 谢坤坚, 卢远, 蔡卓杰, 等. 广西降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 中国水土

保持, 2016(12):50-53.

- [10] 王升, 陈洪松, 付智勇, 等. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测[J]. 土壤学报, 2015, 52(5):1024-1030.
- [11] WANG S, YAN Y, FU Z Y, et al. Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region[J/OL]. Journal of hydrology, 2021, 605[2021-04-27]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127370.
- [12] WANG S, FU Z Y, CHEN H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope[J/OL]. Journal of hydrology, 2020, 580[2021-04-27]. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124370.
- [13] 吴丽萍, 陈洪松, 连晋蛟, 等. 喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析: 以广西壮族自治区为例[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10):1508-1517.
- [14] 田刚, 梁音, 陈效民, 等. 几种降雨侵蚀力模型在湫水河流域的对比研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):7-12.
- [15] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律[J]. 中国水土保持, 1994(4):12-13.
- [16] 郑海金, 方少文, 杨浩, 等. 赣北第四纪红壤坡地降雨侵蚀力的计算与分析[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2):36-40.
- [17] 史东梅, 江东, 卢喜平, 等. 重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9):16-21.
- [18] 史东梅, 卢喜平, 蒋光毅. 紫色丘陵区降雨侵蚀力简易算法的模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2):116-122.

(上接第 155 页)

- [16] 艾超, 孙静文, 王秀斌, 等. 植物根际沉积与土壤微生物关系研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1343-1351.
- [17] DAVID C P C, MARIA Y Y S, SIRINGAN F P, et al. Coastal pollution due to increasing nutrient flux in aquaculture sites[J]. Environmental geology, 2009, 58(2):447-454.
- [18] BRUNE D E, SCHWARTZ G, EVERSOLE A G, et al. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems[J]. Aquacultural

engineering, 2003, 28(1/2):65-86.

- [19] 钟哲科, 高智慧. 植物对环境的修复机理及其应用前景[J]. 世界林业研究, 2001, 14(3):23-28.
- [20] 甘新华, 林清. 沉水植物对受污染水体的修复机理及应用前景研究[J]. 环境科技, 2008, 21(6):72-75.
- [21] GUTIERREZ-WING M T, MALONE R F. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications[J]. Aquacultural engineering, 2006, 34(3):163-171.