

基于未确知测度-集对分析模型的城市人居水环境评价

宋 帆,杨晓华,边得会,刘 童

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室,北京 100875)

摘要:以水环境压力、水环境质量、水环境保护及建设能力 3 项指标作为准则层,共选取了人口密度等 20 个指标作为人居水环境评价指标体系。在此基础上,建立未确知测度-集对分析模型对长江下游 5 省 2006—2015 年人居水环境健康状况进行了时空变化评价,并进行了集对势分析和敏感指标识别。结果表明:长江下游 5 省人居水环境健康评价等级由好到差依次是江西省、浙江省、安徽省、上海市、江苏省;江西省和浙江省整体水环境健康状况能达到Ⅲ级(亚健康),江西省欠缺的是水环境保护能力,而浙江省则需要控制人口增长对水资源带来的压力;安徽省水环境健康状况为Ⅳ级(不健康),主要是水环境质量较差;上海市和江苏省劣于Ⅳ级,3 个准则层都需要进行改善提高。

关键词:人居水环境;未确知测度;集对分析;集对势;敏感性分析;长江下游
中图分类号:X820.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)S1-0109-04

随着我国城市化进程的加快,大量人口涌入城市,导致城市水环境负荷大大超过城市水体的可承载容量及自净能力,出现了水资源短缺、水体污染等一系列问题。也有一些城市由于不重视水生态问题而导致城市洪涝频繁,这些都给人类居住带来了不便与危害。人居环境质量的提升、城市空间形态的改善以及土地价值的开发等在很大程度上都与城市水环境密切相关^[1]。因此如何正确地评价城市人居水环境健康状况,并且识别敏感因子对于今后人居水环境治理以及城市水生态的可持续发展都有十分重要的意义。

城市人居水环境是人居环境的重要组成部分。人居水环境是否健康包括以下两方面的含义:人居水环境自身的健康状况以及其对城市经济发展和生活需求的支持能力大小^[2]。目前对于城市人居水环境的评价主要是从水质方面来进行的,但是只从治理后水质方面的评价并不能完全表现完整的水环境状态。需要从水环境压力、水环境质量以及可持续发展能力等多方面进行多层次、多因素的评价^[3]。目前采用的主要方法有系统动力学模型^[2]、指标体系法^[4-5]、投影寻踪模型^[6]、LCA 法^[7]等。本研究采用未确知测度模型与集对分析相结合的方法,首先建立多层次多指标的人居水环境评价指标

体系,然后利用熵权法确定指标权重。最后通过未确知测度模型确定各省多年多指标测度评价矩阵并用集对分析法确定评价等级,进而确定人居水环境健康状况以及敏感性因子。

1 未确知测度计算理论

假设需要评价人居水环境的评价对象 P 有 n 个,则评价对象空间 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 设有 m 个评价指标,则评价指标集 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\}$ 。若用 x_{ij} 表示第 i 个评价对象 P_i 对于第 j 个评价指标 Q_j 的测量值,则 P_i 可表示为 m 维向量。假设有 p 个评价等级,组成评价等级空间 $H = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 。设 R_k 为第 $k(k=1, 2, \dots, p)$ 级评价等级标准,且第 k 级比第 $k+1$ 级人居水环境安全等级高,记为 $R_k > R_{k+1}$,若满足 $R_1 > R_2 > \dots > R_k$,则称 $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ 是评价等级空间 H 的一个有序分割类^[8]。

若用 μ_{ijk} 表示测量值 x_{ij} 对于第 k 个评价等级 R_k 的隶属度,而且未确知测度 μ 满足以下 3 式,其中式(2)称为归一性,式(3)称为可加性^[9]:

$$0 \leq \mu(x_{ij}) \leq 1 \quad x_{ij} \in R_k \tag{1}$$

$$\mu(x_{ij}) = 1 \quad x_{ij} \in H \tag{2}$$

$$\mu(x_{ij}) = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij}) \quad x_{ij} \in R_k \tag{3}$$

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506603,2016YFC0401305);国家自然科学基金(41530635,51379013,51679007)
作者简介:宋帆(1994—),男,硕士研究生,研究方向为水资源承载力。E-mail:guicai0014@mail.bnu.edu.cn
通信作者:杨晓华,教授,博士。E-mail:xiaohuayang@bnu.edu.cn

根据测度函数求出评价对象的各指标测度值, 则将 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 称为单指标测度评价矩阵^[10]:

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \cdots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \tag{4}$$

若用 $\mu_{ik} = \mu(P_i \in R_k)$ 表示评价样本 P_i 对于第 k 个评价等级 R_k 的隶属度,则:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad i = 1, 2, \cdots, n; k = 1, 2, \cdots, p \tag{5}$$

式中, w_j 是第 j 个指标的权重,本次研究采用熵权法测定权重。本研究称矩阵 $(\mu_{ik})_{n \times p}$ 为人居环境健康综合测度矩阵:

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \cdots & \mu_{np} \end{bmatrix} \tag{6}$$

2 集对分析计算理论

与普通的未确知理论模型不同,在得到预测矩阵后,本研究不是采用置信度识别模型来判别其归属类别,而是将其与集对分析理论相结合计算其关联度从而确定其所属等级。

2.1 集对分析基本原理

集对分析方法的基本原理是首先对要研究的问题构建具有一定联系的两个集对,对集对中两集合的特性进行同一、差异、对立的系统分析,然后用联系度 μ 表达式定量刻画,再推广到多个集合组成的系统。对于两个给定的集合组成的集对,在某个具体问题背景下,对集对的特性展开分析,共得到 N 个特性,其中有 S 个为集对中两个集合共同具有;有 G 个特性为两个集合对立的,其余的 $F = N - S - G$ 个特性既不相相互对立又不为这两个集合共同具有^[11],则有:

$$\nu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{G}{N}j \tag{7}$$

$$\nu = a + bi + cj \tag{8}$$

式中: ν 为联系度,可以全面、系统地刻画所要研究集对之间的同异反联系,所以又称为同异反联系度; a, b, c 为联系度分量, $a, b, c \in [0, 1]$ 且为实数, a, c 相对确定, b 相对不确定且满足归一化条件 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数,规定其恒取值 -1 ^[12]。若有 p 个评价等级,那么联系度系数可记作 $E = [1, i_1, i_2, \cdots, i_{p-2}, j]^T$ 。

无论是同一等级内部还是不同等级之间都存在着明显的次序关系,因此为了分析趋势变化要引入 $e = a/c$ 来表示集对势的大小,集对势分类见表1。

表 1 集对势分类

e 取值范围	b 取值范围	集对势等级	含义
$e > 1$	$b = 0$	准同势	同一趋势完全确定
	$b < c$	强同势	同一趋势为主
	$c < b < a$	弱同势	同一趋势较弱
	$b > a$	微同势	同一趋势微弱
$e = 1$	$b = 0$	准均势	同一趋势对立趋势相同
	$b < c$	强均势	以均势为主
	$c < b < a$	弱均势	不确定性明显/均势较弱
	$b > a$	微均势	不确定性为主
$e < 1$	$b = 0$	准反势	对立趋势完全确定
	$b < c$	强反势	对立趋势为主
	$c < b < a$	弱反势	对立趋势较弱
	$b > a$	微反势	对立趋势微弱

2.2 集对分析评价模型

将未确知测度综合评价向量 $(\mu_{ik})_{n \times p}$ 作为待评价样本在各评价等级上的同异反隶属度矩阵,那么评价对象 P_i 的综合评价联系系数可记作^[13]:

$$\nu_i = a + b_1 i_1 + b_2 i_2 + \cdots + b_{p-2} i_{p-2} + cj \tag{9}$$

式中: ν_i 为 p 元联系系数;将 $[-1, 1]$ 进行 $p-1$ 等分, b_i ($i = 1, 2, \cdots, p-2$)为各分界点数值; $a = 1, c = -1$ 。

通过式(9)可得出各评价对象的评价联系度主值,再与建立的评价等级标准对比即可得出人居环境评价等级。

3 实例应用

3.1 研究区概况

本研究以长江下游5省(图1)为例。长江下游位于亚热带,这里是东亚季风盛行地区,四季分明,冬夏长,春秋短,雨量充沛,光照较足。全年总降雨量的70%集中在4—9月份,汛期在6—9月份,由于冷暖空气交替影响,天气变化较复杂,易出现灾害性气候。长江下游地区是我国经济最发达、城市化水平最高、对外开放度最大的地区,在我国经济发展中具有举足轻重的地位。近年来,长江下游城市群人水关系紧张,流域性水环境污染、城市水资源利用效率低等问题十分严峻,持续改善人居环境质量的任务十分艰巨。

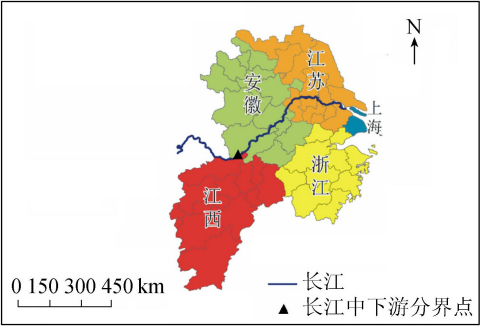


图 1 研究区域

3.2 建立人居水环境评价指标体系

水环境是否健康,能否可持续发展受到很多因素影响,本研究选取水环境压力、水环境质量和水环境保护及建设能力^[14]3个方面建立了包含20个指标的综合指标体系。由于本次评价涉及5个省份的空间对比,因此选取的指标全部具有空间上的可比性,具体指标体系见表2。运用分级标准化法将每个指标分为5级,评价等级集为 $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$,分别代表:很健康、健康、亚健康、不健康和很不健康。每级都根据参考文献以及法规标准设置一个取值标准,根据分级标准建立测度函数。

表2 评价指标体系以及权重

准则层	指标	单位	权重
水环境 压力 A	人口密度 Q_1	人/km ²	0.1243
	人口自然增长率 Q_2	%	0.0485
	人均拥有道路面积 Q_3	m ² /人	0.0050
	人均 GDP Q_4	元/人	0.0384
	人均需水压力 Q_5	m ³ /人	0.0061
	废污水排放强度 Q_6	万 t/km ²	0.2127
	单位面积化肥施用量(折纯量) Q_7	t/km ²	0.0307
水环境 质量 B	Ⅲ类水以上比例 Q_8	%	0.0210
	饮用水源地达标率 Q_9	%	0.0020
	人均每日居民生活用水量 Q_{10}	L/d	0.0047
	单位 GDP 用水量 Q_{11}	m ³ /万元	0.0528
	水资源开发利用率 Q_{12}	%	0.1389
	人均水资源量 Q_{13}	m ³ /人	0.0922
	平均降水量 Q_{14}	mm	0.0080
水环境 保护以及 建设能 力 C	城镇污水处理率 Q_{15}	%	0.0035
	自然保护区比例 Q_{16}	%	0.0457
	建成区绿化覆盖率 Q_{17}	%	0.0007
	建成区排水管道密度 Q_{18}	km/km ²	0.0265
	环保投资占 GDP 比重 Q_{19}	%	0.0068
	生态用水比例 Q_{20}	%	0.1314

3.3 评价结果与分析

根据人居水环境健康评价等级将 $[-1,1]$ 5等分: $[-1,-0.6)$, $[-0.6,-0.2)$, $[-0.2,0.2)$, $[0.2,0.6)$, $[0.6,1.0]$ 共5个区间分别对应“V很不健康”、“IV不健康”、“Ⅲ亚健康”、“Ⅱ健康”、“I很健康”。江苏省2015年人居水环境评价等级为“V很不健康”,且集对势为弱反势。同理可得各省2006—2015年人居水环境评价等级以及集对势,见表3。

根据计算的联系度主值以及表3中评价等级可知,近10年长江下游5省人居水环境健康状况由差到好排名是:江苏省、上海市、安徽省、浙江省和江西省。江苏省10年人居水环境都处于V级,人居水环境较差,保护治理任务艰巨;评价结果整体处于弱反势,有较大的改善的可能性,但需要长期的努力。上海市略好于江苏省,近两年评价等级上升到了IV级;评价结果整体处于强反势,较难发生改变,未来治理规划形势也相当严峻。安徽省虽然整体一直处于IV

表3 2006—2015年各省人居水环境评价等级及集对势

年份	江苏省		上海市		安徽省		浙江省		江西省	
	等级	集对势	等级	集对势	等级	集对势	等级	集对势	等级	集对势
2006	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	强反势	Ⅲ	弱反势	Ⅲ	强同势
2007	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅲ	弱反势	Ⅲ	强同势
2008	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	强反势	Ⅲ	弱反势	Ⅲ	强同势
2009	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	强反势	Ⅲ	弱反势	Ⅱ	微同势
2010	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	强反势	Ⅲ	强反势	Ⅱ	弱同势
2011	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅳ	微反势	Ⅲ	强反势
2012	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅲ	微反势	Ⅲ	强同势
2013	V	弱反势	V	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅲ	微同势	Ⅳ	强反势
2014	V	弱反势	Ⅳ	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅲ	微反势	Ⅲ	强同势
2015	V	弱反势	Ⅳ	强反势	Ⅳ	弱反势	Ⅲ	弱同势	Ⅲ	强同势

级,但从联系度主值的计算结果来看人居水环境状况是不断改善的,这从集对势从强反势转化成弱反势也可以看出来,发展趋势良好,照此发展很快就可以达到Ⅲ级。浙江省整体人居水环境健康状况处于Ⅲ级,处于中等状态;从集对势的变化中分析,弱反势-微反势-同势的变化表明该省水环境状态在向着好的方向转化,且改善速度较快。江西省人居水环境状态整体表现最好,在Ⅱ级和Ⅲ级间波动。但年际间变化非常大,极易受到自然条件的影响,如何通过人为干预将水环境状态稳定在较高水平是当务之急。

通过单指标测度叠加可得到各省准则层评价等级见表4,由表4评价结果分析各省准则层状态可知,江苏省水环境压力、水环境质量、水环境保护及建设能力都处于较差状态;经济的高速发展、人口激增以及城镇化建设都给水环境带来了巨大压力,需要全面加强水资源保护以及水污染处理能力。上海市由于人口众多,单位面积上承受的水环境压力巨大,但近年来水环境质量以及可持续发展能力方面在逐渐增强,说明在政策以及治理上的努力收到了成效,今后应继续在改善可持续发展能力上努力,使经济建设和水环境状态共同进步^[16]。安徽省作为5省中靠近内陆的省份,整体用水压力不大,工作重点应放在水环境质量的改善上,增加水质量达标率以及增强用水效率。与安徽省相似,江西省由于人口压力不大因此水环境压力方面评价等级较好,而且由于降雨量丰富,在水资源量上也是在5省中遥遥领先;今后工作重点应放在处于V级的“水环境保护及建设能力”上,增加城市绿化覆盖率提高城市涵养水源能力以及增加生态用水等。浙江省水环境保护及建设能力是5省中最好的,水环境质量也逐渐稳定在了Ⅱ级,如果今后能在控制人口增长以及增强循环用水方面进行改善,浙江省人居水环境质量可整体提升到“健康”以上状态。

为了讨论指标值灵敏度问题,本文对评价指标对于评价等级的灵敏度进行了分析。以 2015 年的指标数据为基准值,依次让各个指标数值变好 10%或变差 10%,其他指标保持不变,分析人居水环境健康评价结果的变化。结果发现:部分单项指标增减会改变该指标所在的准则层等级,对整体人居水环境评价结果没有影响;有的指标会改变最终人居水环境评价等级。这些指标可被定义为本次评价中的敏感性指标,除了之前提出的改善建议,这些指标在规划治理中也可作为重点关注对象提出针对性的措施。敏感性指标见表 5,其中 P 为整体人居水环境状况。

表 4 2006—2015 年各省人居水环境准则层评价等级

年份	江苏省			上海市			安徽省			浙江省			江西省		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2006	V	V	V	V	V	V	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V
2007	V	V	V	V	V	V	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V
2008	V	V	V	V	V	V	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V
2009	V	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅲ	V	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
2010	V	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	V	V	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	I	Ⅲ
2011	V	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅳ	V	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	V
2012	V	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅳ	V	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	V
2013	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅳ	V	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V
2014	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	V	Ⅲ	Ⅳ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V
2015	V	V	V	V	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	I	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	V

表 5 指标敏感性分析结果

增减幅度	上海市		安徽省		浙江省		江西省	
	指标	变化后等级	指标	变化后等级	指标	变化后等级	指标	变化后等级
变好 10%	Q_{15}	C(Ⅲ)	Q_1	P(Ⅲ)				
	Q_{16}	C(Ⅲ)	Q_6	P(Ⅲ)				
	Q_{18}	C(Ⅲ)	Q_{12}	P(Ⅲ);B(Ⅲ)				
	Q_{19}	C(Ⅲ)	Q_{13}	P(Ⅲ)				
	Q_{20}	C(Ⅲ)	Q_{14}	P(Ⅲ)				
变差 10%			Q_1	A(Ⅳ)	Q_6	A(V)	Q_1	A(Ⅲ)
			Q_{20}	C(Ⅳ)			Q_6	A(Ⅲ)
							Q_7	A(Ⅲ)

参考文献:

[1] 宋军继. 浅谈当前城市水环境现状及发展对策[J]. 水土保持研究, 2003,10(3):114-116.

[2] 刘启明,张晨岚,林锦美,等. 厦门城市水环境承载力综合指标体系评价[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2008(1):94-96.

[3] 章恒全,王旭华,谢丹. 基于模糊层次分析的城市水环境治理绩效评价[J]. 统计与决策,2006(22):60-62.

[4] 何月峰,沈海萍,冯晓飞,等. 基于压力-状态-响应模型和“五水共治”决策的浙江省水环境安全评价[J]. 水资源保护, 2016,32(6):104-109.

[5] 何贝贝,李绍飞,朱习爱. 天津市水环境安全评价及其

4 结 论

a. 建立了人居水环境健康评价的未确知测度-集对分析模型,定量对长江下游 5 省多年人居水环境进行了时空分析;引入了集对势理论,得到人居水环境的变化态势;识别了敏感性指标,为水环境重点建设指明了方向。

b. 综合考虑水环境压力、水环境质量、水环境保护及建设能力 3 方面要素对长江下游 5 省人居水环境健康状况进行了综合评价,结果显示 5 省人居水环境健康由好到差排名为:江西省、浙江省、安徽省、上海市和江苏省,并且由于自然、经济条件的不同,各省水环境治理状态各有差异。

指标体系研究[J]. 水资源保护, 2016,32(1):125-129.

[6] 石永琦. 基于投影寻踪模型的城市水环境承载力评价分析[J]. 水利科技与经济, 2015,21(4):47-48.

[7] 王晓昌,王巧,熊家晴. 宝鸡市城市水环境系统 LCA 研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006(6):741-745.

[8] 黄丹,史秀志,邱贤阳,等. 基于多层次未确知测度-集对分析的岩质边坡稳定性分级体系[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017,48(4):1057-1064.

[9] 李斌华,朱飞. 基于未确知测度理论泵送混凝土输送稳定性预测模型[J]. 中国矿业, 2017,26(增刊1):415-419.

(下转第 116 页)

Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of restinga subjected to excess iron[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 78(2):265.

[13] YANG L, LI Y, YANG X, et al. Effects of iron plaque on phosphorus uptake by pilea cadierei cultured in constructed wetland[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(1):1508-1512.

[14] CHEN C C,DXION J,TURNER F. Iron coatings on rice roots: morphology and models of development[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5): 1113-1119.

[15] TAYLOR G J, CROWDER A A, RODDEN R. Formation and morphology of an iron plaque on the roots of typha *Latifolia L.* grown in solution culture[J]. American Journal of Botany, 1984, 71(5):666-675.

[16] 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学报,2014,34(10): 2470-2480.

[17] BATTY L C, BAKER A J M, WHEELER B D. Aluminium and phosphate uptake by Phragmites austrails: the role of Fe, Mn and Al root plaques [J]. Ann Bot, 2002, 89(4): 443-449.

[18] CHABBI A. Juncus bulbosus as a pioneer species in acidic lignite mining lakes: interactions, mechanism and survival strategies. [J]. New Phytologist, 2010, 144(1):133-142.

[19] WANG T, PEVERLY J H. Iron oxidation states on root surfaces of a wetland plant (phragmites australis) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(1): 247-252.

[20] 刘文菊,朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. 生态学报,2005,25(2): 358-363.

[21] 徐德福. 富营养化水体人工湿地生态修复机理及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[22] XU D, XU J M, HE Y, et al. Effect of iron plaque formation on phosphorus accumulation and availability in the rhizosphere of wetland plants[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, 200(1/2/3/4):79-87.

[23] 史锟,张福锁,刘学军,等. 不同栽培方式对籼粳稻根表铁膜和根铁镉含量的影响[J]. 应用生态学报,2003, 14(8):1273-1277.

[24] 傅友强,于智卫,蔡昆争,等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(6):1527-1534.

[25] 姚海兴,叶志鸿. 湿地植物根表铁膜研究进展[J]. 生态学杂志,2009, 28(11): 2374-2380.

[26] 孟冬梅,朱永官,周建国. 水稻根系通气组织与根表铁膜关系的研究[J]. 现代农业科学,2008,15(4): 55-58.

[27] WU C, YE Z, LI H, et al. Do radial oxygen loss and external aeration affect iron plaque formation and arsenic accumulation and speciation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(8):2961.

[28] ZHANG X, ZHANG F, MAO D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza Sativa, L.*): phosphorus uptake[J]. Plant and Soil, 1999, 209(2):187-192.

[29] 刘敏超,李花粉,夏立江,等. 不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系[J]. 环境科学学报, 2000,20(5): 592-596.

[30] 杨婧,胡莹,王新军,等. 两种通气组织不同的水稻品种根表铁膜的形成及砷吸收积累的差异[J]. 生态独立学报,2009,4(5): 711-717.

[31] UPFER M, DOLLAN A. Immobilization of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2003, 509(1/2/3):635-640.

[32] 曾祥忠,吕世华,刘文菊,等. 根表铁-锰氧化物胶膜对水稻铁锰和磷锌营养的影响[J]. 西南农业学报, 2001,14(4): 34-38.

[33] CROWDER A A, SY-CYR L. Iron oxide plaques on wetland roots[J]. Trends in Soil Science, 1991,1: 315-329.

[34] CHRISTENSEN K K, WIGAND C. Formation of root plaques and their influence on tissue phosphorus content in lobelia dortmanna[J]. Aquatic Botany,1998, 61(2): 111-122.

[35] 钟顺清. 湿地植物根表铁膜对磷的响应及其对磷的利用[J]. 广东农业科学, 2012, 39(21):70-73.

(收稿日期:2017-11-30 编辑:王 芳)

+++++

(上接第112页)

[10] 靳颜宁,李夕兵,刘彭金,等. 基于改进的未确知聚类模型的岩爆倾向性预测[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1):12-16.

[11] 沈俊源,吴凤平,于倩雯. 基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(2):92-97.

[12] 邢永健,王旭,杜航. 集对分析在区域大气环境风险评价中的应用研究[J]. 中国环境科学, 2016,36(2): 634-640.

[13] 王栋,梁忠民,常文娟,等. 基于模糊集对分析的引江济太调水效益综合评价[J]. 水资源保护, 2017,33(1):35-40.

[14] 刘畅,冯宝平,张展羽,等. 基于压力-状态-响应的熵权-物元水生态文明评价模型[J]. 农业工程学报, 2017,33(16):1-7.

[15] 高彩玲,田采霞,麻冰涓. 基于熵权法的焦作市城市生态系统健康动态评价[J]. 水土保持通报, 2015,35(3):197-202.

[16] 张蓉珍,范华. 2000—2011年西安市水环境演变与社会经济发展关系的量化分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(5):67-71.

(收稿日期:2017-12-10 编辑:王 芳)