

青土湖绿洲植被指数适用性及优选研究

杨丽娟, 黄峰*, 潘若云, 张清清 (淮海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要 [目的]为精准评价青土湖绿洲植被恢复情况,开展植被指数适用性及优选研究。[方法]基于2013—2019年植被生长旺季的Landsat8-OLI遥感数据,分析归一化植被指数、比值植被指数、大气阻抗植被指数等8种常用植被指数;采用趋势分析法研究各植被指数的变化特征,通过评价植被指数时空变化特征与绿洲实际恢复特征的一致性研究各植被指数的适用性;基于各植被指数的变化率及趋势显著性,评价不同植被指数检测青土湖绿洲恢复的敏感性。[结果]增强植被指数、归一化植被指数、土壤调节指数和修改型土壤调节指数对青土湖绿洲植被覆盖变化相对敏感,是适用于青土湖绿洲、能有效检测绿洲植被覆盖变化的植被指数。[结论]研究成果可为青土湖生态输水调控及绿洲恢复管理提供一定的技术支撑和科学参考。

关键词 植被指数;适用性;敏感性;生态输水;青土湖

中图分类号 Q948 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)19-0065-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.19.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Applicability and Optimization of Vegetation Index in Qingtu Oasis

YANG Li-juan, HUANG Feng, PAN Ruo-yun et al (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

Abstract [Objective] In order to evaluate the vegetation restoration in Qingtu Oasis accurately, the study on the applicability and optimization of vegetation index in Qingtu Oasis was carried out. [Method] Based on the Landsat8-OLI remote sensing data of the flourishing vegetation season from 2013 to 2019, the normalized difference vegetation index, ratio vegetation index, atmospherically resistant vegetation index and the other 5 vegetation indexes were analyzed. Then the trend analysis was used to study the variation characteristics of each vegetation index. The applicability of each vegetation index was studied by evaluating the consistency between the temporal and spatial variation characteristics of vegetation index and the actual recovery characteristics of oasis. Based on the change rate and trend significance of each vegetation index, the sensitivity of different vegetation indexes to detect the recovery of Qingtu Lake Oasis was evaluated. [Result] The enhanced vegetation index, normalized difference vegetation index, soil-adjusted vegetation index and modified soil-adjusted vegetation index were relatively sensitive to the change of vegetation cover in Qingtu Oasis, which were suitable for effectively detecting the change of vegetation cover in Qingtu Oasis. [Conclusion] The research results can provide certain technical support and scientific reference for ecological water conveyance regulation and oasis restoration management of the Qingtu Lake.

Key words Vegetation index; Applicability; Sensitivity; Ecological water conveyance; Qingtu Lake

植被指数(vegetation index, VI)是对地表植被状况的简单有效的度量,也是评价干旱区生态输水效应的常用指标^[1]。当前已有归一化植被指数、土壤调节植被指数、比值植被指数等上百种植被指数产品应用于科研生产实践,不同的植被指数由于地理环境、植被覆盖度、植被生长状况等因素的影响,对于不同的地区有不同的适用性和敏感性^[2]。郭玉川等^[3]研究了归一化植被指数、增强植被指数等4种指数反演植被覆盖度的精度,建议选择归一化植被指数以评估塔里木河生态输水后的生态恢复程度;林茜等^[4]在塔里木河流域通过评估归一化植被指数、比值植被指数等和植被覆盖度的相关性,建议选择归一化植被指数以获取植被信息。

我国河西走廊石羊河流域尾间青土湖自生态输水以来,水域及绿洲面积在一定程度上得到恢复,整体植被覆盖度有所增加。鉴于不同植被指数在不同区域识别植被特征的适用性差异以及检测植被覆盖变化的敏感性差异,为科学准确地评估石羊河流域生态输水对其尾间青土湖绿洲的恢复效应,开展植被指数适用性及优选研究。笔者选取在干旱、半干旱地区较为常用的8种植被指数开展比较研究,遴选适用于检测青土湖地区植被覆盖变化的指数,为生态输水调控提

供参考,也为其他流域合理选取植被指数、科学监测植被覆盖变化提供借鉴。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 青土湖绿洲位于石羊河流域尾间(图1),地处甘肃省民勤县东北部,在巴丹吉林沙漠东南部、腾格里沙漠西部,地理位置39°04'~39°09'N、103°36'~103°39'E^[5]。青土湖地区年均气温7.8℃,降水稀少且主要集中在7—9月,多年平均降水量仅110mm^[6],全年盛行西北风,属于温带大陆性干旱气候^[7]。

青土湖曾是石羊河流域最大的湖泊,水域面积超过400km²。后来因气候变化和流域上、中游不合理用水等因素影响,湖泊面积开始萎缩,加上红崖山水库的修建,青土湖地表水补给源逐渐消失,于1959年彻底干涸^[8]。青土湖干涸导致民勤地区失去了天然的生态屏障,植被减少、荒漠化加剧,生态系统严重退化^[6]。为促进当地生态恢复,2010年9月石羊河流域综合治理工程有计划地向下游生态输水,青土湖开始形成人工季节性水面,区域环境质量明显好转^[9]。

1.2 数据选取与方法

1.2.1 遥感影像 选取青土湖生态输水后2013—2019年逐年 Landsat8-OLI 遥感数据,下载于美国地质调查局提供的网站 <https://earthexplorer.usgs.gov/>。卫星访问地球的周期为16d, TM1~TM9的9个波段空间分辨率均为30m。根据青土湖绿洲的经纬度范围,选择的OLI数据行号为131,列号

基金项目 国家重点研发计划(2017YFC0406101)。

作者简介 杨丽娟(1999—),女,江苏南通人,从事水务工程研究。*通信作者,副教授,博士,硕士生导师,从事水文水资源、生态水文研究。

收稿日期 2020-03-31

为 33。综合考虑云量信息和植被信息,收集整理 7、8 月份的遥感影像资料。利用 ENVI 5.3 软件预处理遥感影像,主要包括辐射定标、大气校正、图像裁剪、去除异常值等。

1.2.2 植被指数。选取在干旱、半干旱地区较为常用的归一化植被指数、比值植被指数、大气阻抗植被指数等 8 种植被指数,其计算公式如表 1 所示,其中,NIR、RED、GREEN 和 BLUE 分别是近红外波段(0.845~0.885 μm)、红光波段(0.630~0.680 μm)、绿光波段(0.525~0.600 μm)和蓝光波段(0.450~0.453 μm)的反射率;*L* 是土壤亮度校正因子,随

绿色植被数量的变化而变化,采用 Huete^[13] 建议的 *L* 最佳取值 0.5;*C*₁、*C*₂ 是大气修正参数;*l* 为土壤调节参数,取值分别为 6.0、7.5 和 1.0^[17];γ 为光学路径的效应因子,取决于气溶胶的类型,采用 Kaufman 等^[12] 推荐的取值 1。NDVI、ARVI、SAVI、MSAVI2、NDGI 和 EVI 取值为-1~1,非正值代表裸地或者水体,正值表示有绿色植被,且越接近 1 表示植被覆盖度越大^[12-15]。RVI 取值在 0~2 和 8~30 时无绿色植被覆盖,在 2~8 时表示有植被覆盖,且数值越接近 8 表示植被覆盖度越大^[11]。DVI 取值随植被覆盖的增加而增加^[17]。

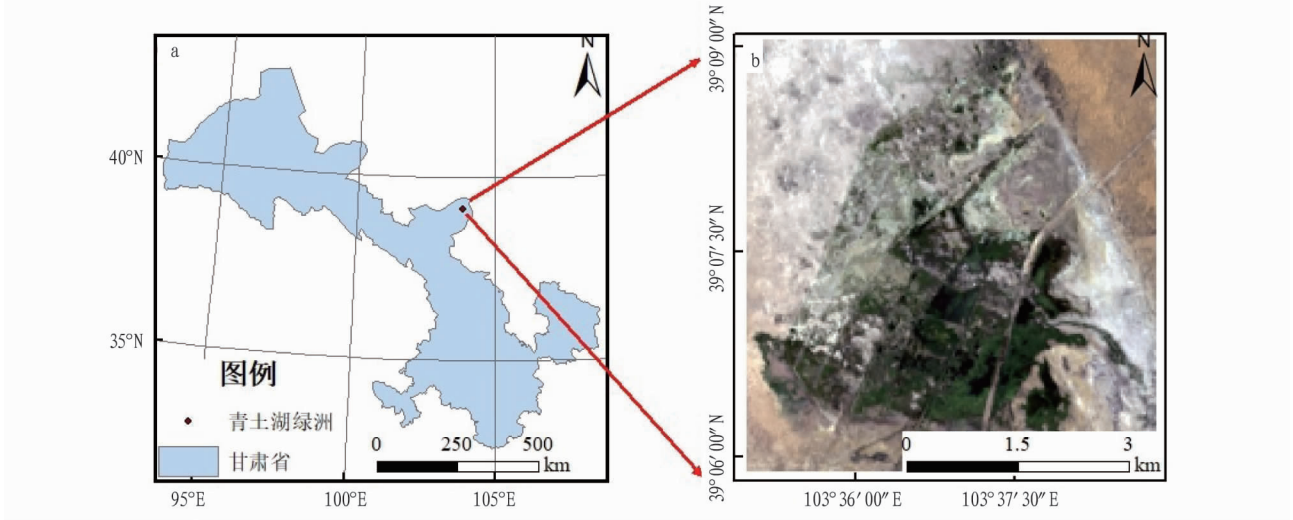


图 1 青土湖地理位置(a)和 2019 年 7 月 24 日遥感影像(b)
Fig.1 Geographical location of Qingtu Lake (a) and remote sensing images on July 24,2019 (b)

表 1 主要植被指数简介
Table 1 Brief introduction of main vegetation indices

序号 No.	植被指数 Vegetation index	英文全称 English full name	简写 Abbre- viation	计算公式 Calculation formula	取值范围 Value range
1	归一化植被指数 ^[10]	Normalized Difference Vegeta- tion Index	NDVI	$\frac{\text{NIR}-\text{RED}}{\text{NIR}+\text{RED}}$	[-1,1]
2	比值植被指数 ^[11]	Ratio VegetationIndex	RVI	$\frac{\text{NIR}}{\text{RED}}$	[0,30]
3	大气阻抗植被 指数 ^[12]	Atmospherically Resistant Vegetation Index	ARVI	$\frac{\text{NIR}-[\text{RED}-\gamma(\text{BLUE}-\text{RED})]}{\text{NIR}+[\text{RED}-\gamma(\text{BLUE}+\text{RED})]}$	[-1,1]
4	土壤调节植被指数 ^[13]	Soil-adjusted Vegetation Index	SAVI	$\frac{(\text{NIR}-\text{RED})\times(1+L)}{\text{NIR}+\text{RED}+L}$	[-1,1]
5	修改型土壤调节植 被指数 ^[14]	Modified Soil-adjusted Vegetation Index	MSAVI2	$\frac{2\times\text{NIR}+1-\sqrt{(2\times\text{NIR}+1)^2-8\times(\text{NIR}-\text{RED})}}{2}$	[-1,1]
6	归一化差异绿度指数 ^[15]	Normalized Difference Green Index	NDGI	$\frac{\text{GREEN}-\text{RED}}{\text{GREEN}+\text{RED}}$	[-1,1]
7	差值植被指数 ^[16]	Difference Vegetation Index	DVI	$\text{NIR}-\text{RED}$	—
8	增强植被指数 ^[17]	Enhanced Vegetation Index	EVI	$\frac{2.5\times(\text{NIR}-\text{RED})}{\text{NIR}+C_1\times\text{RED}-C_2\times\text{BLUE}+l}$	[-1,1]

基于预处理后的青土湖绿洲遥感图像,运用 ENVI 5.3 软件的指数计算工具(vegetation index calculator)和波段运算工具(band math)进行植被指数的计算。采用均值法进行归一化预处理,消除不同植被指数量级差异对适用性及敏感性评价的影响。

1.2.3 适用性及敏感性评价。针对各个植被指数,采用一元线性回归法逐像元拟合其变化趋势,以综合反映研究区域

植被的时空演变情况。根据一元线性拟合线的斜率 *s* 与回归分析显著性 *P* 值将变化趋势分为 5 个等级:显著下降(*s*<0,*P*≤0.01)、下降(*s*<0,0.01<*P*≤0.05)、无明显变化(*P*>0.05)、上升(*s*>0,0.01<*P*≤0.05)、显著上升(*s*>0,*P*≤0.01)^[18]。采用 Kappa 系数衡量不同植被指数分析成果的一致性,识别性能相近的植被指数;通过对比分析各植被指数所表征的植被覆盖变化趋势与植被实际动态变化特征的

一致性,评估植被指数的适用性。由 Kappa 系数值表示一致性的程度:一致性程度极差 ($Kappa < 0$)、一致性程度微弱 ($0 \leq Kappa \leq 0.20$)、一致性程度弱 ($0.20 < Kappa \leq 0.40$)、一致性程度一般 ($0.40 < Kappa \leq 0.60$)、一致性程度高 ($0.60 < Kappa \leq 0.80$)、一致性程度极高 ($0.80 < Kappa \leq 1.00$)^[19]。在敏感性评价中,分析各植被指数 2013—2019 年逐年的空间平均值;采用一元线性回归法分析空间均值序列的变化趋势斜率及显著性,评价各指数对绿洲植被恢复变化的敏感性。

2 结果与分析

2.1 植被指数适用性分析 生态输水以来,青土湖绿洲植被呈较为显著的恢复趋势。植被覆盖区域由湖区向外缘荒

漠区扩展,总体呈扩大趋势;距离湖区越近,植被覆盖密度增加越显著;距离湖区较远的区域植被覆盖密度增加不明显^[20-21]。NDVI、RVI、SAVI、EVI 和 MSAVI2 的分析成果与青土湖绿洲实际恢复情况较为一致(图 2),各指标分析成果之间的 Kappa 系数都在 0.6~1.0,一致性程度达到高、极高水平(表 2)。ARVI、NDGI、DVI 的分析成果与青土湖绿洲实际恢复情况差异较大(图 2),且 ARVI、NDGI、DVI、NDVI、RVI、SAVI、EVI、MSAVI2 分析成果的 Kappa 系数都低于 0.6,一致性较低,表明 ARVI、NDGI、DVI 在青土湖绿洲的适用性相对较差。其中,ARVI 反映植被覆盖在外围荒漠区呈显著下降趋势,NDGI 反映 83% 的区域植被覆盖呈显著下降趋势,DVI 在植被覆盖较高的水域附近无明显变化。

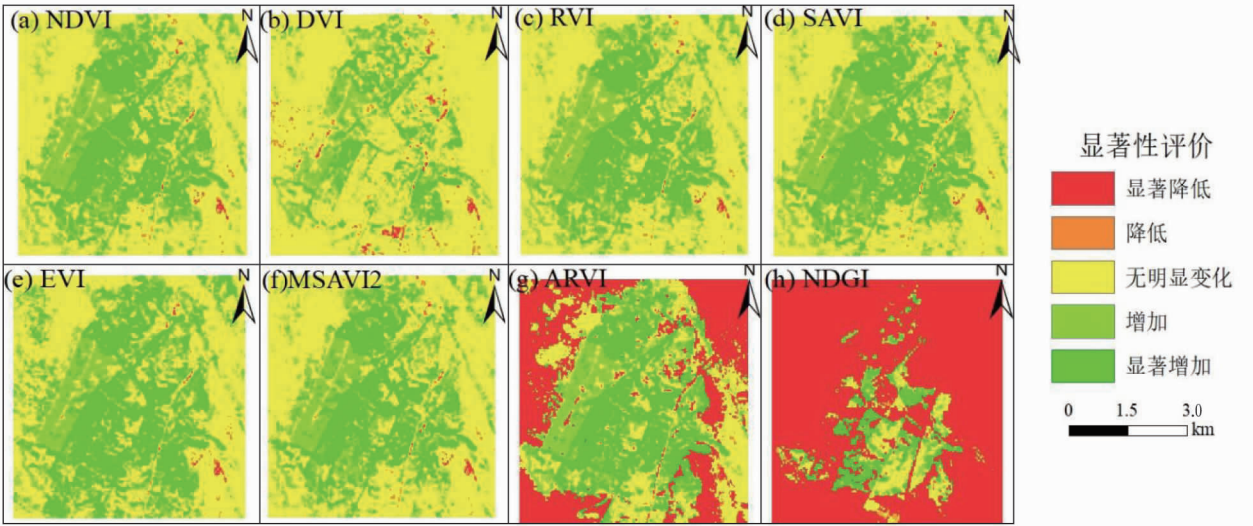


图 2 2013—2019 年青土湖绿洲植被时空变化特征

Fig.2 Spatial and temporal variation characteristics of vegetation in Qingtu Oasis during 2013–2019

表 2 Kappa 系数及一致性分析

植被指数 Vegetation index	NDVI	RVI	SAVI	EVI	MSAVI2	ARVI	NDGI	DVI
NDVI	1.00	极高	极高	高	极高	一般	微弱	弱
RVI	0.92	1.00	极高	高	极高	弱	微弱	弱
SAVI	0.99	0.92	1.00	高	极高	一般	微弱	弱
EVI	0.63	0.60	0.63	1.00	高	一般	微弱	弱
MSAVI2	0.95	0.87	0.88	0.62	1.00	一般	微弱	弱
ARVI	0.42	0.40	0.42	0.45	0.41	1.00	微弱	微弱
NDGI	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.17	1.00	微弱
DVI	0.38	0.37	0.38	0.34	0.38	0.19	0.02	1.00

2.2 植被指数敏感性分析 各植被指数空间均值序列趋势分析成果(图 3)表明,各指数均呈显著上升趋势。其中,EVI、NDVI、SAVI、MSAVI2 的趋势变化率基本一致,RVI、ARVI、DVI、NDGI 的趋势变化率相对较低,表明 EVI、NDVI、SAVI 和 MSAVI2 检测青土湖绿洲恢复变化特征的性能基本一致,RVI、ARVI、DVI 和 NDGI 检测青土湖绿洲恢复变化特征的敏感性相对较低。

由于 DVI 对土壤背景的变化敏感,比较适合在低植被覆盖区监测生态环境的变化。当植被覆盖度较低时,DVI 随生

物量的增加而增加,较高时 DVI 对植被的灵敏度下降。青土湖湖区附近自生态输水以来植被覆盖高且增加趋势显著^[20],DVI 在此情况下易饱和,因此 DVI 对湖区附近的敏感性较低。ARVI 使用蓝光波段和红光波段的组合矫正大气散射的影响,在该研究中外围荒漠低植被覆盖区的应用效果相对较差,可能在一定程度上受裸地背景的影响。NDGI 选用红光波段和绿光波段的亮度值作为波段组合的信息源,两者亮度差异值较小,应用于检测青土湖绿洲植被恢复的效果相对较差。因此 DVI、ARVI 和 NDGI 三者在青土湖绿洲的适用

性和敏感性不足。

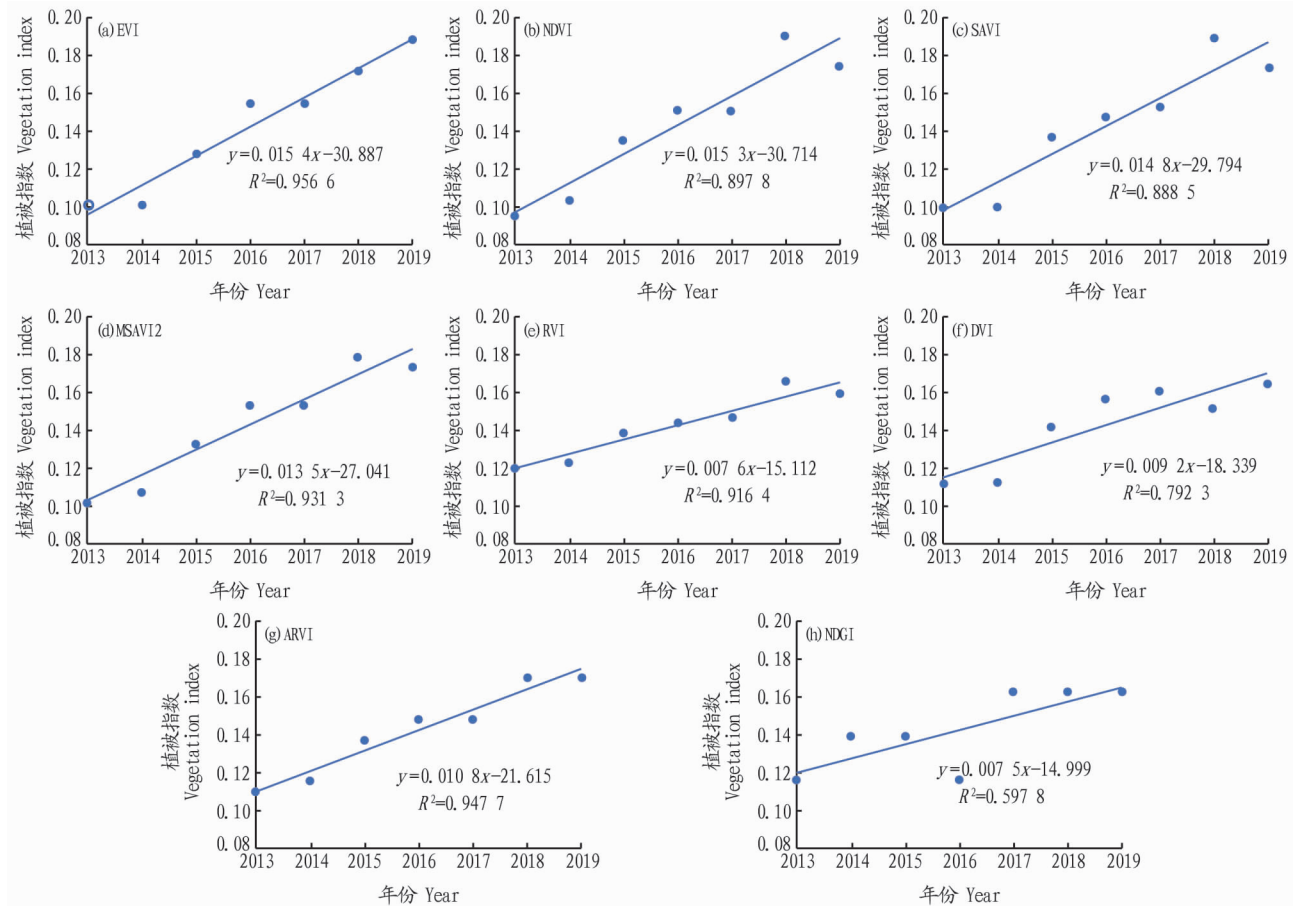


图3 2013—2019年青土湖绿洲植被指数空间均值年际变化趋势

Fig. 3 Interannual change trend of spatial mean of vegetation index in Qingtu Oasis during 2013–2019

3 结论

生态输水以来,青土湖绿洲的植被覆盖区域由湖区向周围荒漠扩大,总体覆盖密度呈增加趋势。NDVI、RVI、SAVI、EVI 和 MSAVI2 能客观反映这一变化趋势,应用于评价青土湖绿洲生态恢复的适用性较好;ARVI、NDGI、DVI 未能客观反映青土湖绿洲恢复特征,其适用性相对较差。综合植被指数空间均值变化率及趋势显著性评价,EVI、NDVI、SAVI、MSAVI2 检测青土湖绿洲植被覆盖变化的敏感性相对较高,RVI 的敏感性相对较弱。建议在青土湖生态恢复评价工作中选用 EVI、NDVI 等植被指数。

参考文献

- [1] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71–75.
- [2] 贺金兰, 张明月, 田尉霞. 基于遥感影像的不同植被指数比较研究[J]. 科技创新与应用, 2017(6): 36–37.
- [3] 郭玉川, 何英, 李霞. 基于 MODIS 的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选[J]. 国土资源遥感, 2011(2): 115–118.
- [4] 林茜, 郭飞, 黄昌春, 等. 基于 MODIS 的植被指数对估测塔里木河中下游植被盖度的适用性[J]. 草业科学, 2016, 33(12): 2434–2441.
- [5] 张华, 张玉红, 张改改. 民勤绿洲青土湖植被优势种地上生物量估算[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 201–210.
- [6] 陈政融, 刘世增, 刘淑娟, 等. 芦苇和白刺空间格局对青土湖生态输水的响应[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 1960–1968.
- [7] 赵强, 王乃昂, 李秀梅, 等. 青土湖地区 9500a BP 以来的环境变化研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 352–359.
- [8] YANG X M, LIU S Z, YANG T B, et al. Spatial-temporal dynamics of desert vegetation and its responses to climatic variations over the last three

- decades: A case study of Hexi region in Northwest China[J]. Journal of arid land, 2016, 8(4): 556–568.
- [9] 刘淑娟, 袁宏波, 刘世增, 等. 石羊河尾间水面形成区土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 285–289.
- [10] ROUSE J W, JR, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[C]//Proceedings of third earth resources technology satellite-1 symposium. Washington: NASA, 1974: 310–317.
- [11] JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663–666.
- [12] KAUFMAN Y J, TANRE D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 261–270.
- [13] HUETE A R. A Soil Adjusted Vegetation Index(SAVI)[J]. Remote Sens Environ, 1988, 25(3): 295–309.
- [14] JIANG Z Y, HUETE A R, LI J, et al. Interpretation of the modified soil-adjusted vegetation index isolines in red-NIR reflectance space[J]. Journal of applied remote sensing, 2007, 1: 1–12.
- [15] RHEW I C, VANDER STOEP A, KEARNEY A, et al. Validation of the normalized difference vegetation index as a measure of neighborhood greenness[J]. Annals of epidemiology, 2011, 21(12): 946–952.
- [16] BECKER F, CHOUDHURY B J. Relative sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) and microwave polarization difference Index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring[J]. Remote sensing of environment, 1988, 24(2): 297–311.
- [17] LIU H Q, HUETE A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmosphere noise[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1995, 33: 457–465.
- [18] WOLTERS M, GARbutt A, BAKKER J P. Salt-marsh restoration: Evaluating the success of de-embankments in north-west Europe[J]. Biological conservation, 2005, 123(2): 249–268.

(下转第 72 页)

的化粪池系统,通过庭院消纳、农田施肥、沼气发酵等手段,提高粪污资源化程度。

表 2 现有的化粪池规范和标准

Table 2 Existing norms and standards for septic tanks

改厕模式 Change toilet mode	现有标准 Existing standards	编号 No.
模式一 Mode 1	粪便无害化卫生标准	GB 7959—2012
	农村户厕卫生规范	GB 19379—2012
	玻璃钢化粪池技术要求	CJ/T 409—2012
	塑料化粪池	CJ/T 489—2016
	预制钢筋混凝土化粪池	JC/T 2460—2018
	农村三格式户厕建设技术规范	GB/T 38836—2020
	农村三格式户厕运行维护规范	GB/T 38837—2020
	浙江省:农村厕所建设和服务规范	DB33T 3004.2—2015
	山东省:一体式三格化粪池(聚乙烯、共聚聚丙烯、玻璃纤维增强复合材料)	DB37/T 2792—2016
	湖北省:农村无害化厕所建造技术指南	DB 45/T 1495—2019
模式二 Mode 2	湖南省:湖南省农村厕所建设技术导则(试行)	
	黑龙江省农村室内户厕改造技术导则(试行)	
	给水排水工程构筑物结构设计规范	GB 50069—2002
	建筑给水排水设计规范	GB 50015—2003
	室外排水设计规范	GB 50014—2006
	下水道及化粪池气体监测技术要求	GB/T 28888—2012
	户用生活污水处理装置	CJ/T 441—2013
	农村生活污水处理工程技术标准	GB/T 51347—2019

(2)在模式二中,针对不同地区的农村污水排放标准与典型区域的生态要求,构建化粪池系统的模块化处理技术,在不同的应用场景下形成化粪池单元的生物强化处理、化粪池单元与生态耦合处理和化粪池单元排泄物的就地处理等技术。

(3)建立适宜农村地区化粪池标准与管理体系,完善多元化投入机制,积极培育改厕服务市场。

参考文献

[1] PICKERING A J, DAVIS J. Freshwater availability and water fetching distance affect child health in sub-Saharan Africa[J]. Environmental science & technology, 2012, 46(4): 2391-2397.

[2] ODAGIRI M, SCHRIEWER A, DANIELS M E, et al. Human fecal and pathogen exposure pathways in rural Indian villages and the effect of increased latrine coverage[J]. Water research, 2016, 100: 232-244.

[3] 国家卫生健康委员会. 中国卫生健康统计年鉴[M]. 北京:中国协和医科大学出版社, 2018.

[4] 陈杰, 姜红. 化粪池在实际生活中的比选及应用[J]. 环境与发展, 2018, 30(2): 45-46, 48.

[5] 范彬, 王洪良, 张玉, 等. 化粪池技术在分散污水处理中的应用与发展[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1314-1321.

[6] 武海霞, 孙文全, 吴慧芳, 等. 化粪池新管理模式的探讨[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 14-17.

[7] BUTLER D, PAYNE J. Septic tanks: Problems and practice[J]. Building and environment, 1995, 30(3): 419-425.

[8] 陈颖, 于奇, 贾小梅. 借鉴日本《净化槽法》健全我国农村生活污水治理政策机制[J]. 中国环境管理, 2019, 11(2): 14-17.

(上接第 68 页)

[19] LANDIS J R, KOCH G G. The measurement of observer agreement for categorical data[J]. Biometrics, 1977, 33(1): 159-174.

[20] 赵军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影

[9] BRADLEY B R, DAIGGER G T, RUBIN R, et al. Evaluation of onsite wastewater treatment technologies using sustainable development criteria[J]. Clean technologies and environmental policy, 2002, 4(2): 87-99.

[10] 陈国良, 魏海春. 全国农村改厕产业市场化现状调查[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(4): 328-331.

[11] 颜维安, 陈晓进, 杭德荣, 等. 二格式粪便处理池无害化效果现场调查研究[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2004(5): 371-373.

[12] 杭德荣, 陈晓进, 杨坤, 等. 预制式二格化粪池户厕建设及卫生效果研究[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2007(2): 136-138.

[13] 茂名市卫生防疫站, 省卫生防疫站. 三格化粪池池型结构对无害化效果的影响实验观察[J]. 广东医药资料, 1975(5): 6-9.

[14] BURUBAI W, AKOR A J, LILLY M T, et al. An evaluation of septic tank performance in Bayelsa State, Nigeria[J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2007, 9: 1-9.

[15] 任丽华, 楼晓明, 陈卫中, 等. 浙江省农村卫生厕所无害化效果现状调查[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(10): 924-925.

[16] 钟格梅, 唐振柱, 郑承杰, 等. 广西农村户厕及粪便无害化处理现状调查[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(2): 131-133.

[17] 宋珍霞, 王里奥, 黄川, 等. 复合微生物制剂对化粪池污泥厌氧消化效果的影响[J]. 中国给水排水, 2009, 25(19): 20-23.

[18] 黄川, 王里奥, 宋珍霞, 等. 有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1636-1642.

[19] 崔华胜, 王晓燕. 化粪池投放生物分解剂效果分析[J]. 环境科技, 2012, 25(6): 16-20.

[20] RICHARDS S, RICHARDS S, PATTERSON E, WITHERS P J A, et al. Septic tank discharges as multi-pollutant hotspots in catchments[J]. Science of the total environment, 2016, 542: 854-863.

[21] 王玉华, 方颖, 焦隽. 江苏农村“三格式”化粪池污水处理效果评价[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 80-83.

[22] 汤克敏, 李传国. 化粪池改型与沼气利用的研究[J]. 环境卫生工程, 1994(4): 14-17.

[23] 付婉霞, 秦晓晶, 汪燕. 改进型山区村庄三格化粪池污水处理效果的试验研究[J]. 给水排水, 2009, 35(S2): 283-285.

[24] 范建伟, 张杰, 尹大强. 加强型生物化粪池/潜流人工湿地处理农村生活污水[J]. 中国给水排水, 2009, 25(24): 69-71.

[25] 陈志强, 关华滨. 新型化粪池处理生活污水启动阶段的实验[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1267-1272.

[26] 韦昆, 傅大放, 王亚军. 新型化粪池处理分散农户生活污水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 59-62.

[27] 王昶, 李琳, 谈玉琴, 等. 多户化粪池联用的生活污水净化槽的研究[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 26-29.

[28] 王立东, 刘德明, 马世斌, 等. 改进型农村三格化粪池的污水处理性能[J/OL]. 环境工程学报, 2020-03-31[2020-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5591.X.20200331.1046.026.html>.

[29] 吴珊, 唐世文, 赵铨, 等. 化粪池内部流态数值模拟与结构优化探讨[J]. 给水排水, 2013, 39(5): 142-145.

[30] 宋伟民, 卢纯惠, 李锦梅. 土壤渗滤处理三格化粪池粪液的可行性论证[J]. 上海环境科学, 1997, 16(3): 36-37.

[31] BEAL C D, GARDNER E A, MENZIES N W. Process, performance, and pollution potential: A review of septic tank-soil absorption systems[J]. Soil research, 2005, 43(7): 781-802.

[32] 刘雯, 崔理华, 朱夕珍, 等. 水平流-垂直流复合人工湿地对化粪池含氮污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1235-1239.

[33] 徐德星, 海热提, 丁文明, 等. 人工湿地对化粪池出水净化效果的对比研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 164-168.

[34] CONNELLY S, PUSSAYANAVIN T, J RANDLE-BOGGIS R J, et al. Solar Septic Tank; Next generation sequencing reveals effluent microbial community composition as a useful index of system performance[J]. Water, 2019, 11(12): 1-14.

[35] 孙成军. 小型户用污水处理设备在寒冷及严寒地区农村厕所改造中的应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.

[36] 赵猛, 童薇, 高建和, 等. 基于 ANSYS 的塑料化粪池力学分析与加强方案探讨[J]. 机械工程与自动化, 2013(5): 20-22.

响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1251-1261.

[21] CHUNYU X Z, HUANG F, XIA Z Q, et al. Assessing the ecological effects of water transport to a lake in arid regions: A case study of Qingtu Lake in Shiyang River basin, Northwest China[J]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(1): 1-14.