

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.03.09

台风强降雨及雨后泥石流对广东 高州水库生态环境的影响

周文婷^{1,2}, 邵瑞华², 张雅洲³, 马千里¹, 胡艳芳¹, 洗宪恒⁴, 苟 婷¹, 许振成¹, 赵学敏¹

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 2. 西安工程大学, 陕西 西安 710000;
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100000;
4 广州市璞境生态保护技术有限公司, 广东 广州 510730)

摘要: 2010 年受“凡亚比”台风强降雨及诱发的次生灾害泥石流影响, 高州水库集水区植被及水环境质量受到严重损害。为评估此次灾害对集水区生态环境的影响, 对比分析了灾害前后遥感数据及水体水质变化。结果表明, 灾害对集水区高植被覆盖度区域造成较严重破坏, 高植被覆盖度区域呈下降趋势, 灾后集水区的高植被覆盖区转出面积 (932.7 km²) 大于转入面积 (889.4 km²), 主要转变为中植被覆盖度区域, 高植被覆盖度区域实际面积由灾前 932.28 km² 减少到灾后 889.404 km², 面积减少 42.884 km²; 中植被覆盖度面积增加 37.354 km², 无植被及低植被覆盖面积变化不大。灾后短时间内造成水库水质发生较大变化, 库区及入库河流中 DO、pH、SD、COD_{Mn} 与 Chl. a 浓度降低; 浊度与 TN、NO₃-N、NH₄-N、TP、Fe 浓度升高; 三条入库河流 Fe 浓度超出地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 中限值, 其中古丁河口处 Fe 浓度超标限值 6.4 倍; 古丁河 TN 浓度和朋情河口处 TN、TP 浓度均超地表水Ⅲ类标准; 水库供水口底层水体 TN、TP 含量浓度超地表水Ⅲ类标准, Fe 浓度也超出标准限值, 严重影响供水水质。由于台风强降雨极端气候变化和土地使用改变等因素综合影响, 区域灾害类型趋向复合型变化, 使得生态环境保护和供水水质安全保障面临更大的挑战。

关键词: 高州水库; 台风; 泥石流灾害; 植被覆盖度

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)03-0060-10

Effect of typhoon heavy rainfall and secondary debris flow on ecological environment of Gaozhou Reservoir

ZHOU Wenting^{1,2}, SHAO Ruihua², ZHANG Yazhou³, MA Qianli¹, HU Yanfang¹,
XIAN Xianheng⁴, GOU Ting¹, XU Zhencheng¹, ZHAO Xuemin¹

(1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou, Guangdong 510655, China; 2. School of Environmental and Chemical, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;
4. Guangzhou Purescape Ecological Protection Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510730, China)

Abstract: The terrestrial vegetation of the catchment area and water quality of Gaozhou reservoir were seriously damaged due to extreme heavy rainfall and secondary debris flow that induced by typhoon “Fanapi” in 2010. Remote sensing and water quality data were collected and analyzed to evaluate the impact of the heavy rainfall and debris flow. The results showed that the area with high vegetation coverage transferred out (932.7 km²), was more than that of transferred into (889.4 km²) the catchment. It was mainly transferred to medium

收稿日期: 2017-08-29; 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (41401115); 环保公益性行业科研专项 (201509027); 广州市科技计划产学研协同创新重大专项 (201704030110)

第一作者: 周文婷 (1990-), 女, 硕士生, 主要从事水污染控制研究。E-mail: 1572408815@qq.com

通讯作者: 赵学敏 (1981-), 女, 专业研究员, 主要从事水生态风险评估研究。E-mail: zhaoxuemin@scies.org

vegetation coverage area. The absolute area of high vegetation coverage changed from 932.28 km² to 889.40 km² after the disaster with a decrease of 42.88 km². The area of medium vegetation coverage increased 37.35 km². There was no significant change in area of low vegetation coverage and non-vegetation coverage area. Water quality of the reservoir and tributary inflows changed obviously, the concentration of DO, pH, transparency, COD_{Mn} and Chl. a decreased, and the turbidity and concentration of TN, NO₃-N, NH₄-N, TP and Fe increased. Concentration of Fe in the three tributary inflows exceeded the limit in Environmental Quality Standard of Surface Water (GB 3838-2002), and the Fe concentration of Guding River was 6.4 times higher than the standard limit. TN concentration of Guding River and TP concentration of Pengqing River exceeded the limit of grade Ⅲ in GB 3838-2002. TP and TN concentration of the bottom water, near the water supply opening exceeded the limit of grade Ⅲ in GB 3838-2002 as well as the Fe concentration, which reduced the quality of drinking water remarkably. Conclusively, the protection of ecological environment and drinking water quality in Gaozhou reservoir are facing big challenge due to the complex disaster caused by extreme climate and abuse of land.

Keywords: Gaozhou Reservoir; typhoon; debris flow disaster; vegetation coverage

0 引言

近年来全球台风灾害规模不断扩大,灾害频率也急剧攀升^[1]。台风强降雨易引发滑坡、山洪、泥石流等地质灾害,造成严重的经济损失与人员伤亡。2011年强热带风暴“洛克”和2014年强台风“浣熊”,导致日本部分地区出现高强度降雨,并诱发山体滑坡和泥石流灾害^[2-3]。2005年和2012年飓风“卡特里娜”和“桑迪”横扫美国南部和东海岸,诱发的洪水灾害造成巨大的经济损失^[4-5]。2013年台风“海燕”登陆菲律宾南部,部分地区出现的严重洪灾造成惨痛的经济损失和人员伤亡^[6]。我国也频繁受台风灾害影响,台风登陆前后引发的风、雨、潮常常给沿海地区造成较大的灾害^[7],近十年台风灾害每年都给我国造成上百亿甚至千亿元损失^[8]。2006年7月强热带风暴“碧利斯”^[9]、2009年8月台风“莫拉克”^[10-17]、2010年强台风“凡亚比”、2013年8月强台风“尤特”^[18]在我国福建、广东等沿海地区造成了严重的山洪、泥石流和滑坡灾害,对生态环境与生命财产安全均造成严重的影响。

台风强降雨引发的山洪、崩塌、山体滑坡、泥石流等系列次生灾害不仅对森林植被造成破坏,同时强降雨冲刷地表携带大量土石和垃圾进入水体,极易造成水环境质量下降引发水生态系统的变化。研究发现台风过境后能够导致区域植被减少近50%^[19],台风引起的滑坡和泥石流灾害可使植被区域变成裸地或是水体^[20];台风诱发的洪水灾害增加了水体的搅动,带来充足的营养物质,不仅降低水环境质量^[21],还会促进水生生物群落的演变,导致浮游植物生物量的变化^[22-24]。

广东省地处华南沿海地区,海岸线较长,主要受热

带与亚热带季风气候控制,成为我国西太平洋台风影响的主要区域,也是建国以来台风登陆最多的省份,台风灾害已成为影响广东社会经济发展的主要灾种之一^[25-26]。2010年9月20日第11号强台风“凡亚比”(英文名:Fanapi)以35 m/s的风速从福建漳浦登陆,受此台风影响广东高州地区遭遇200年一遇的特大暴雨,日均降雨量高达120 mm,导致9月21日高州水库集水区上游马贵镇发生特大洪灾(9·21洪灾),并引发山体滑坡和泥石流次生灾害,据现场统计截至9月28日下午17时,暴雨造成高州市七镇受灾,受灾人口16.7万人,受灾农作物面积43.3 km²。造成直接经济损失30多亿元。9·21特大洪灾导致大量的有机质、泥砂、植物、垃圾及家禽家畜等动物尸体进入库区,对高州水库水环境质量及浮游植物群落结构产生影响^[27]。为了评估“凡亚比”台风强降雨引发的特大洪灾及泥石流对库区内生态环境的影响,本研究根据灾害前后集水区植被覆盖度以及水库水环境质量变化,分析台风强降雨及次生灾害泥石流对集水区内陆生植被及水库水环境质量的影响。结合区域社会经济发展与人类活动干扰状况,提出应对极端气候台风强降雨的环境管理对策,为未来区域减灾防灾与保障供水安全提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

高州水库位于广东省西部 N 21°58′~22°19′和 E 110°59′~111°23′),是茂名市唯一饮用水源地。水库由良德库区和石骨库区通过0.7 km人工河相连接,水库面积为58.94 km²,库容为1.15×10⁹ m³。水库集水区面积1 022 km²,包括马贵、大坡、古丁、深镇、平山

五个镇和东岸、长坡两镇的部分区域。入库河流有深 镇河、古丁河与朋情河(图 1)。

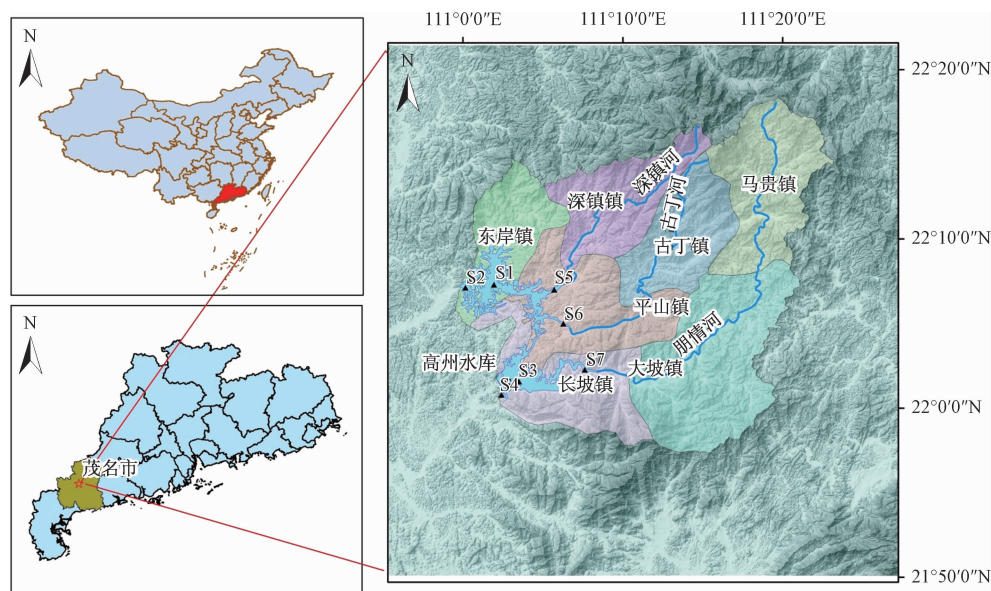


图 1 研究区域图

Fig. 1 The areal map of research area

S1—良德库区中心; S2—良德电站; S3—石骨库区中心采样点;

S4—供水口采样点; S5—深镇河口采样点; S6—古丁河口采样点; S7—朋情河口采样点。

集水区地处北热带和南亚热过渡的季风区,雨量充沛,多年年平均降水量 1 938.8 mm,年均蒸发量 1 650.3 mm,4~9 月的雨量约占全年的 85%,每年 7~9 月常有台风侵袭。集水区内地貌主要以山地为主,山地占总面积的 70% 左右,山地海拔一般在 500~800 m,岸坡多呈 25°~45° 的斜坡。集水区土壤分布以红壤为主,红壤酸性强,富含铁锰等金属元素。集水区内的植被与气候相适应,地带性植被是热带、亚热带常绿阔叶林,但由于长期的人类活动结果,原生植被已不存在,现有植被是在人类活动影响下处于不同发育阶段的次生植被和作物。

1.2 评估方法与数据

1.2.1 灾害对陆生植被的影响评估

以台风强降雨前(2010 年 9 月 19 号)和台风强降雨后(2010 年 10 月 30 号)获取的多光谱、影像分辨率为 30 m 的环境小卫星遥感影像为基础影像,同时选用集水区 1:50 000 地形图、研究区行政边界矢量数据以及该地区 1:50 000 DEM 数据,比较台风强降雨前后集水区地表植被覆盖特征变化,分析台风强降雨及次生灾害泥石流对植被的破坏情况,进一步运用 GIS 分析受损植被的空间特征,评估台风强降雨对植被生态系统的影响。

1.2.2 灾害对水环境质量的评估

根据高州水库水环境质量监测结果,监测指标包

括 pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、浊度(TD) 硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)、硅酸盐(SiO_4)、高锰酸盐(COD_{Mn})指数、叶绿素 a(Chl. a)、铁(Fe)12 个指标,评估台风强降雨及次生灾害泥石流对高州水库水环境质量的影 响,评价依据为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)。

1.3 样品采集及分析

分别于台风强降雨前期(2010 年 9 月 9 日)和后期(2010 年 9 月 25 日)在高州水库开展水环境质量监测,共设置 7 个采样点(图 1)。其中 S4 采样点为供水口,水深约 23 m,为底部出水进入调节水库后给水厂供水,为了解台风强降雨及次生灾害泥石流对供水口水质影响,在该样点水面下 0.5 m、2 m、5 m、10 m 和底层进行分层采样。

现场测定 pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、浊度(TD);采集水样后带回实验室测定叶绿素 a(Chl. a)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP)、铁(Fe)、硅酸盐(SiO_4)指数和高锰酸盐(COD_{Mn})指数,测定方法均参考《水和废水监测分析方法》进行^[28]。

1.4 遥感数据处理与分析

在 ENVI5.1 中对遥感影像进行正射校正、辐射标定、大气校正和地形校正,具体操作过程参照《ENVI 遥感图像处理办法》^[29]。获取具有较高定位精度和准

确地物光谱反射率的遥感影像,结合现场调查,对预处理后的遥感影像进行定量反演,采用面向对象的信息提取方法提取高州水库集水区泥石流发生的范围和面积。计算灾前、灾后两个时期的归一化植被指数(NDVI),利用像元二分模型将 NDVI 转化为植被覆盖度,获取库区植被覆盖情况。

植被覆盖度转换模型为 $F_c = (NDVI - NDVI_{SOI}) / (NDVI_{VEG} - NDVI_{SOI})^{[30]}$

式中: F_c 为植被覆盖度, $NDVI_{VEG}$ 为全植被覆盖像元的 NDVI 值; $NDVI_{SOI}$ 为无植被覆盖的裸土像元的 NDVI 值。 $NDVI_{VEG}$ 和 $NDVI_{SOI}$ 的理论值分别接近于 1 和 0,但是受大气状况、地表粗糙度、地表水分等因素影响, $NDVI_{VEG}$ 和 $NDVI_{SOI}$ 的值会随着时间和空间而改变。结合研究区域的实际情况,本文对在 $NDVI_{VEG}$ 和 $NDVI_{SOI}$ 取值时,以累计百分比为 98% 的累计值为 $NDVI_{VEG}$,2% 的累计值为 $NDVI_{SOI}$ 。同时运用 ArcGIS 10.2 技术生成集水区泥石流灾害发生前、后不同时期的植被覆盖状况,对比得出灾后植被的损害状况。

2 结果与分析

2.1 台风期间降雨量及入库流量特征

受台风“凡亚比”影响,2010 年 9 月 21~23 日水库集水区出现特大暴雨。9 月 21 日 24 小时降雨量高达 130.88 mm,22 日与 23 日的 24h 内降雨量分别为 94.96 mm、34.57 mm(图 2),9 月 21~23 日累计降雨量占 9 月份总降雨量 64%。水库日流量变化趋势和降雨量变化趋势一致,9 月 21 日水库平均入库流量达到了最高值 361.97 m³/s,22 日与 23 日集水区平均流量分别降低为 181.67 m³/s 和 67.27 m³/s。

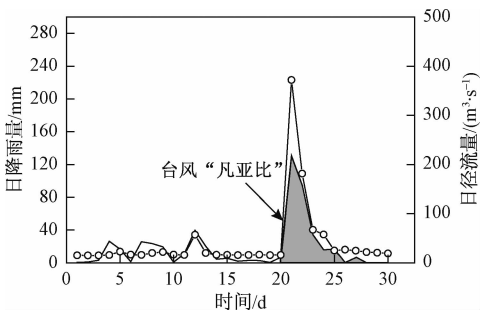


图 2 集水区 9 月日降雨量及流量变化

Fig.2 The daily rainfall and flow in the catchment area in September

2.2 台风强降雨期间泥石流状况及对水体浊度的影响

台风“凡亚比”强降雨引发的泥石流灾害主要发

生在高州水库集水区内的马贵镇、古丁镇和大坡镇,其中马贵镇最为严重,面积共约为 36 km²(图 3)。泥石流发生后入库河流及水体的浊度均升高,朋情河(S7)和深镇河(S5)分别由灾前 4.4 NTU、3.1 NTU 增加到灾后的 32.6 NTU 和 17.2 NTU,古丁河(S6)浊度升高幅度最大,从 17.7 NTU 增加到 374.4 NTU,浊度升高了 21.2 倍(表 1)。由此可见,强降雨导致的次生灾害泥石流,引起了严重的水土流失,是灾后短期内水体浊度快速升高的主要原因。

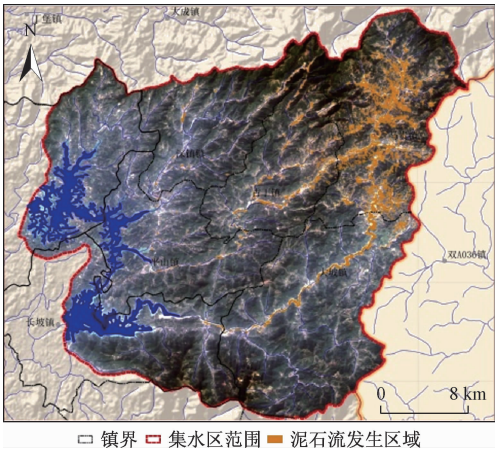


图 3 高州水库集水区泥石流受灾范围

Fig.3 Disaster area of debris flow in catchment area

表 1 灾害前后水体浊度变化特征

Table 1 Change of Turbidity before and after debris flow disaster

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
20100919	1.50	1.90	1.40	3.60	3.10	17.70	4.40
20100925	4.80	2.70	8.70	3.90	17.20	374.40	32.60

2.3 对陆生植被的影响

2.3.1 灾害前后集水区 NDVI 计算及统计结果

基于高州水库集水区灾害前后遥感影像,利用 ENVI 对遥感影像进行预处理并计算两个时期的 NDVI 指数,得到灾前和灾后集雨区 NDVI 分布(表 2、图 4)。泥石流灾害前集水区平均 NDVI 值为 0.567,泥石流灾害后集水区平均 NDVI 值降低为 0.503。灾害前后两期的 NDVI 标准差发生较大变化,灾前集水区 NDVI 标准差为 0.145,灾后集水区 NDVI 标准差升高至 0.169,泥石流对集水区 NDVI 值产生了一定影响。

表 2 泥石流灾害前后集水区 NDVI 统计值

Table 2 Statistics of NDVI before and after debris flow

影像	NDVI 平均值	NDVI 最小值	NDVI 最大值	NDVI 标准偏差
20100919	0.567	-0.240	0.764	0.145
20101030	0.503	-0.366	0.778	0.169

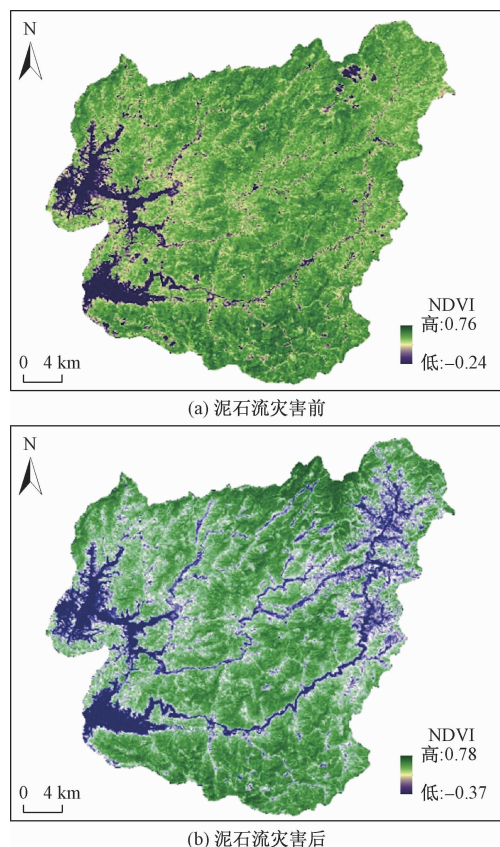


图4 泥石流灾害前(a)及灾后(b)集水区NDVI分布图
Fig. 4 Distribution of NDVI in catchment area before debris flow (a) and after (b)

2.3.2 灾害前后集水区植被覆盖分级变化

依据密度分割法将研究区的植被覆盖度划分为无植被覆盖区、低植被覆盖区、中植被覆盖区和高植被覆盖区^[30]。从集水区植被覆盖分级图5可以看出,泥石流发生后集水区植被覆盖度总体呈现减少趋势,高植被覆盖面积明显减少,中植被覆盖面积增加,而无植被及低植被覆盖面积变化不大(图5)。由植被覆盖度分级图与泥石流受灾范围图进行叠加对比分析可知,受泥石流灾害影响严重区域如马贵镇、古丁镇和大坡镇,植被覆盖度呈现由高植被覆盖向中植被覆盖转化。

根据集水区灾害前后遥感影像对比得到的各类植被面积及其增减情况见表3,灾害前后变化幅度最大的是高植被覆盖区,其面积由灾害前932.28 km²减少到灾后的889.40 km²,面积减少42.88 km²,植被覆盖比例由灾前的91.67%降低至灾后的87.46%,覆盖比例下降4.21%。无植被、低植被和中植被覆盖区面积都有不同程度增加,其中中植被覆盖区面积增加幅度最大,由灾前39.40 km²增加到76.75 km²,面积增加了37.35 km²。以上结果表明灾害对集水区高植被覆

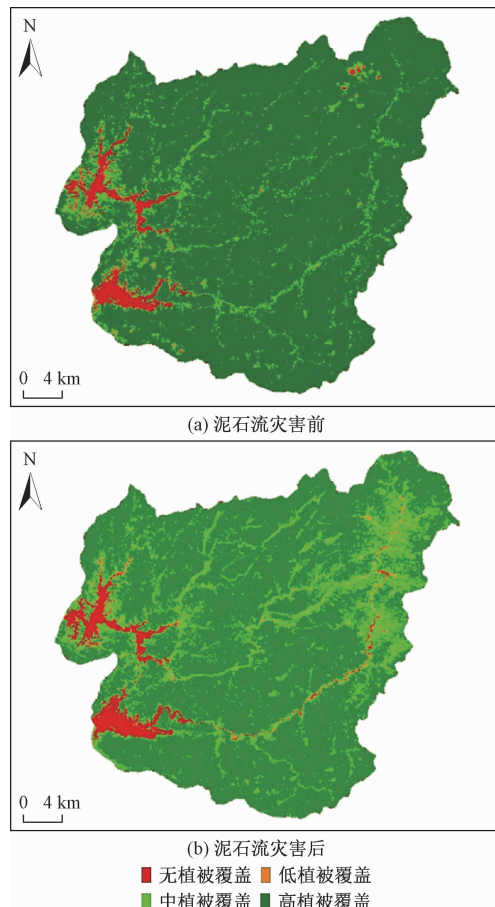


图5 泥石流灾害前(a)灾后(b)集水区植被覆盖分级图
Fig. 5 Vegetation coverrate in catchment area before debris flow (a) and after (b)

盖区造成较严重破坏。

表3 台风强降雨及泥石流次生灾害前后植被覆盖度统计结果
Table 3 Statistical results of vegetation coverage before and after typhoon heavy rainfall and debris flow

植被覆盖等级	无植被覆盖区	低植被覆盖区	中植被覆盖区	高植被覆盖区
灾前像元个数	39 230	11 084	43 775	1 035 870
灾后像元个数	40 885	15 571	85 276	988 277
灾前面积/km ²	35.31	9.98	39.40	932.28
灾后面积/km ²	36.70	14.01	76.75	889.40
灾前百分比/%	3.47	0.98	3.87	91.67
灾后百分比/%	3.61	1.38	7.54	87.46
面积变化/km ²	1.39	4.22	37.35	-42.88

注:无植被覆盖区,主要以水体、云、建筑用地和裸地等构成;低植被覆盖区,植被覆盖度小于30%,主要是草地、疏林地;中植被覆盖区,植被覆盖度介于30%~60%,主要是林地、园地及耕地等;高植被覆盖区,植被覆盖度大于60%,指植被密集的灌木林。

2.3.3 灾害前后植被覆盖区域面积转化分析

在综合分析集水区灾害前后植被覆盖度面积变化的基础上,利用ENVI 5.0进行矩阵分析后得到集水区

灾害前后各级植被覆盖度面积转移矩阵(表 4),以更好地反映各级植被覆盖度的区域面积转化特征。结果表明,灾害过后集水区植被覆盖度呈现下降趋势。高植被覆盖度转出面积最大,转出面积 932.7 km²,大于

转入面积 889.4 km²,植被覆盖度呈下降趋势;共有 58.8 km² 高植被覆盖度发生转变,主要转变为中植被覆盖度区域,转化面积为 52.27 km²,占高植被覆盖转化面积的 89.35%,面积转移率为 68.19%。

表 4 灾害前后集水区植被覆盖度区域面积转移矩阵

Table 4 Area transfer matrix of vegetation coverage before and after debris flow									
20101030	20100919								合计
	无植被覆盖		低植被覆盖		中植被覆盖		高植被覆盖		
	面积/km ²	转移率/%	面积/km ²	转移率/%	面积/km ²	转移率/%	面积/km ²	转移率/%	
无植被覆盖	26.93	78.71	2.95	8.62	2.62	7.66	1.71	5.00	34.21
低植被覆盖	2.80	18.90	2.32	15.73	4.81	32.61	4.82	32.68	14.75
中植被覆盖	1.80	2.34	3.18	4.15	19.4	25.31	52.27	68.19	76.65
高植被覆盖	1.30	0.15	1.55	0.17	12.63	1.42	873.9	98.25	889.4
合计	32.83		10.00		39.46		932.7		1 015.0

注:表中各级植被覆盖度的面积横向表示 20100919-20101030 转出面积,纵向表示 20100919-20101030 转入面积。

2.4 对水库水环境质量影响

2.4.1 灾害前后水库水环境质量

灾后库区及入库河流水质短时间发生了较大变化(图 6),水库及入库河流中 pH、SD 降低,浊度升高;水中 DO、COD_{Mn}、Chl. a 含量降低;TN、NO₃-N、NH₄-N、TP、Fe 浓度升高,SiO₄ 变化不明显。灾后,大量的土壤、泥沙进入水体导致浊度升高和透明度降低,地表径流携带有机污染物进入水体进行呼吸作用造成水中 pH、DO 降低。灾后入库河流的 Fe 含量均升高并超标,其中古丁河超标最严重,Fe 含量从 0.017 mg/L 上升至 1.926 mg/L,超出地表水标准限值 6.4 倍。

灾后水库和入库河流中 TN、NO₃、NH₄-N、TP 浓度增加,水体 Chl. a 浓度降低。灾后 TN 浓度总体表现为升高趋势,其中良德库区中心、古丁河口、朋情河口升高幅度较大。与灾前相比,库区内及入库河流 NO₃-N 含量显著增加($p < 0.05$)。灾后良德库区中心和深镇河口 NH₄-N 浓度增加幅度较大。受台风强降雨及次生灾害泥石流影响,水体 TP 浓度表现为升高趋势,其中朋情河口升高幅度较大,由 0.028 mg/L 升高至 0.079 mg/L,水质由原来的Ⅲ类降低至Ⅳ类。灾害导致水体 Chl. a 浓度含量普遍降低,其中河流入口(S5、S6、S7) Chl. a 含量显著降低($p < 0.01$)。

2.4.2 灾后供水口垂向水层水质分析

由图 7 可见,灾害发生后供水口水体分层显著,表现为表层水温高、DO 含量和 pH 较高,水体浊度较低,随着水深的增加水温、DO、pH 均呈现降低的趋势,浊度呈现明显增加。NH₄-N、NO₃-N、TP、Fe、Mn 浓度随水深增加逐渐升高,表层水体浓度最低,分别为 0.041、0.451、0.019、0.040 和 0.019 mg/L,至底层浓度分别升高到 0.115、0.485、0.21、0.44 和 0.06 mg/L。垂向水体

TN 和 COD_{Mn} 变化趋势一致,水面下 5 m 以内 TN 和 COD_{Mn} 随着水深增加而增加,水深 10 m 处 TN 和 COD_{Mn} 浓度最低,分别为 0.804 mg/L 和 1.350 mg/L,底层达到最大值分别为 1.206 mg/L 和 1.800 mg/L。Chl. a 含量随水深增加先升高后降低,表层水体 Chl. a 含量为 10.4 mg/m³,至水层 5 m 处含量最高,为 13.7 mg/m³,底层 Chl. a 含量最低为 9.6 mg/m³。灾后供水口垂向水质结果表明灾后供水口底层 TP、TN 含量超过地表水Ⅲ类标准,底层 Fe 浓度超出标准限值 0.3 mg/L。由于高州水库供水口从底部取水,灾后供水口底层水体 TN、TP 和 Fe 含量超标将影响水库供水安全。

3 讨论

3.1 台风强降雨对集水区植被及水环境质量影响

我国沿海地区受台风影响频繁^[31],近年来台风强降雨诱发的滑坡、泥石流等地质灾害规模不断扩大,灾害频率也急剧攀升,对生态环境造成严重破坏。台风强降雨对植被演替的影响非常明显^[32],常导致陆生植被植被生态系统受损。研究表明“威马逊”台风过境后导致研究区域内 NDVI 值整体下降^[33]。台风“卡特里娜”造成美国阿拉巴马州沿海植被指数显著降低,台风过境前值为 0.71,台风过境后值仅为 0.36^[19]。泥石流灾害发生后,高州水库集水区域内 NDVI 平均值由 0.567 降低为 0.503。灾后高植被覆盖度转出面积大于转入面积,且主要转变为中植被覆盖度区域,植被覆盖度整体呈下降趋势。

台风强降雨诱发的山洪、泥石流灾害短期内加重水源地的污染状况,地表径流携带有机和无机污染物增加,对供水安全造成严重威胁。台风强降雨导致太湖水体中固体悬浮物含量、TP、TN、溶解性磷酸盐(SRP)、

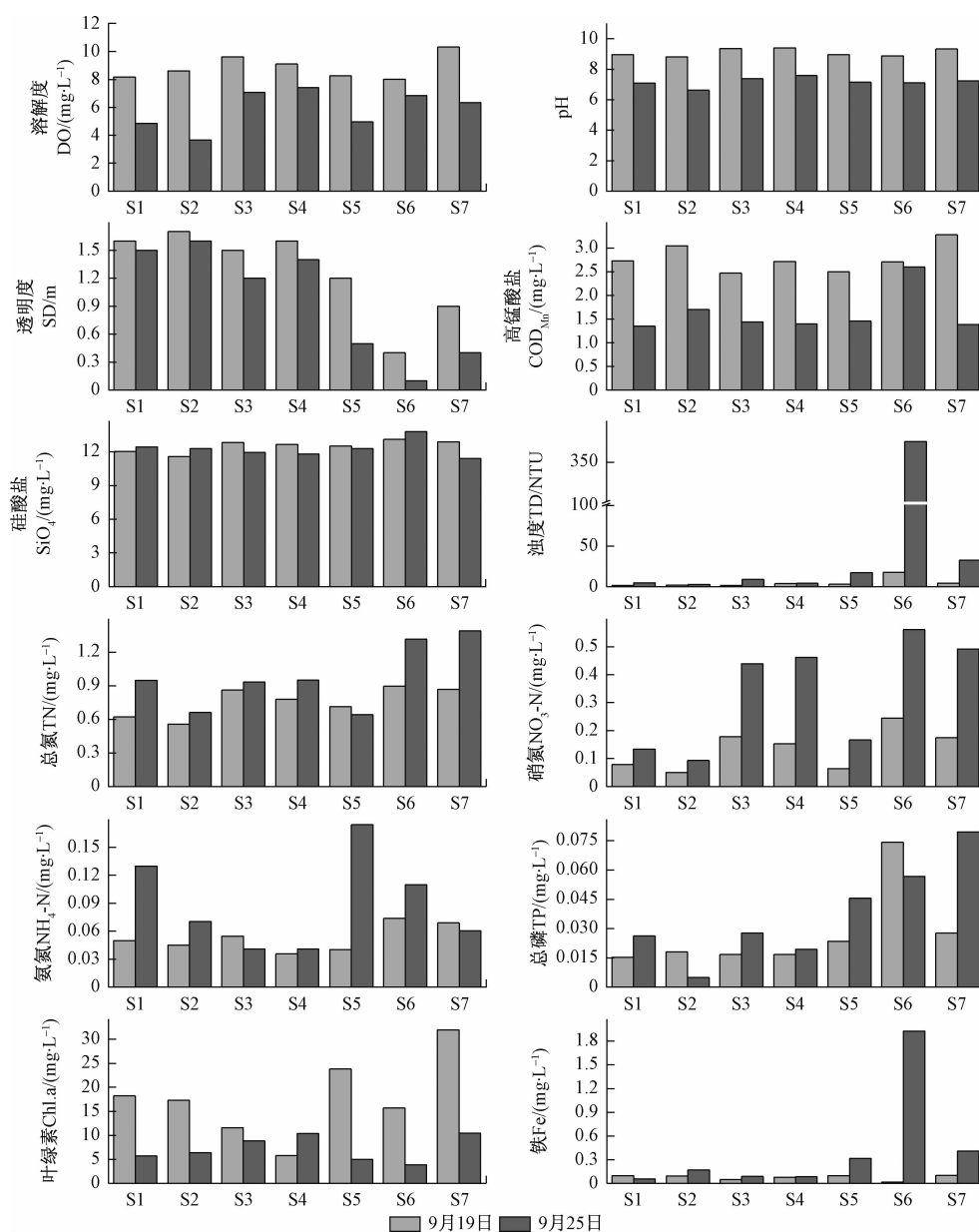


图6 台风强降雨及泥石流灾害前后水库水质变化

Fig. 6 Change of water quality in the Reservoir before and after typhoon heavy rainfall and debris flow

$\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量较台风前分别增加了 4、2、1.5、2.5、3.5 和 1.5 倍^[34]。台风强降雨诱发的山洪、滑坡等水土流失灾害,造成东圳水库悬浮物、浊度、高锰酸盐指数、总磷浓度明显增加,水库水质恶化,不能满足饮用水质量要求^[21]。洪水也曾造成邕江水体 Fe 及有机污染物含量超标^[35]。高州水库集水区发生的台风强降雨诱发山洪泥石流灾害期间,大量有机质、泥沙、污染物等通过地表径流汇入水库,导致灾害后的水体透明度、溶解氧、pH、高锰酸盐指数、叶绿素 a 下降、浊度、氮磷营养盐以及 Fe 浓度升高;三条入口河流 Fe 浓度均超出地表水标准限值,水库供水口处底层水体 Fe 浓度也超标,严重

影响水库供水安全。集水区内以富含铁元素的红壤为主,台风强降雨的强烈冲刷作用形成水土流失,使得水体 Fe 浓度超标。由此可见台风强降雨及次生灾害泥石流导致的水土流失加剧了水污染的程度。

3.2 灾害成因及应对策略

高州水库集水区以山地为主,海拔多在 500 ~ 800 m,岸坡多呈 25° ~ 45° 斜坡,地形较复杂,处于山坡地高风险区,为滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害的形成提供了前提。同时,库区内不合理的人类活动改变了集水区自然生态系统的结构和功能,破坏了库区的自然平衡,降低了抵抗自然灾害的能力,加剧了灾情。主要

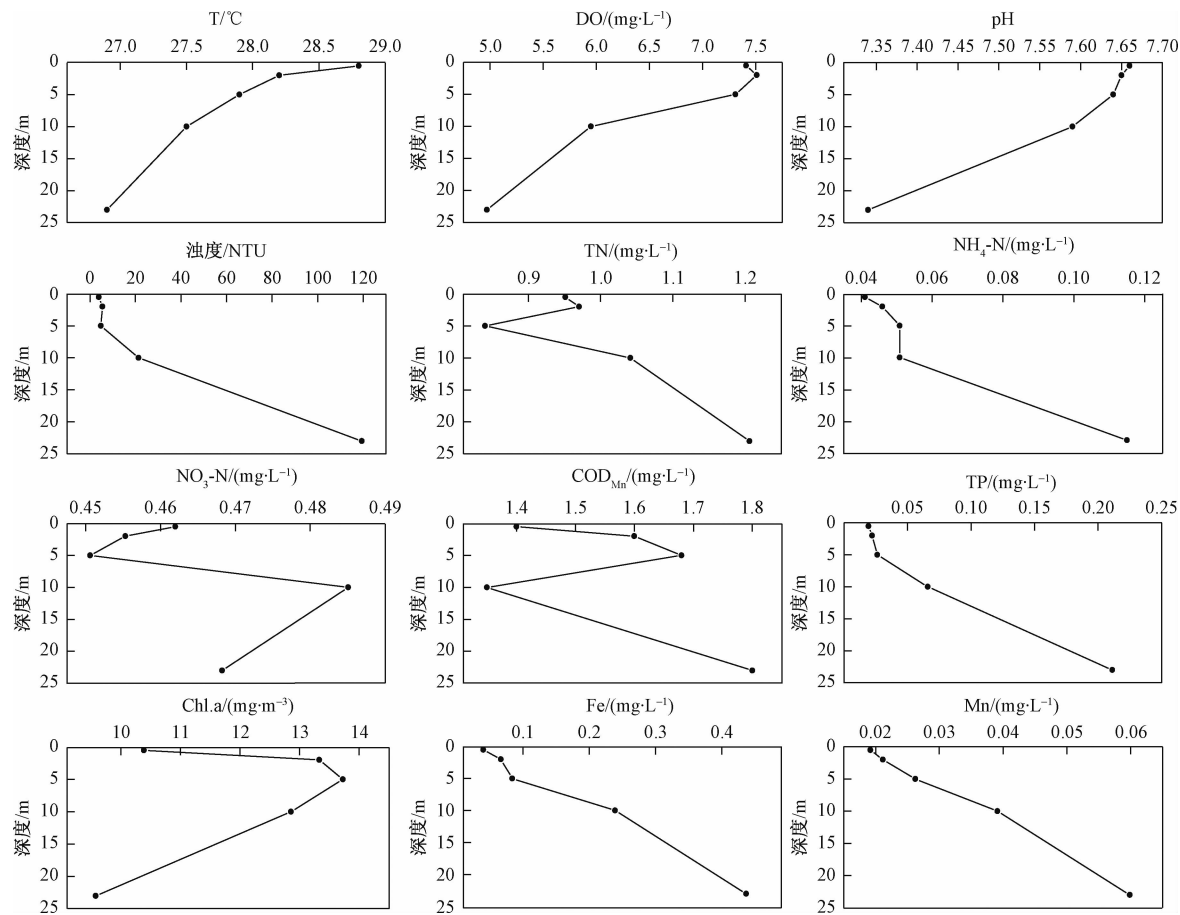


图 7 灾后供水口垂向水质分析

Fig. 7 Vertical water quality analysis of post-disaster water supply

体现在集水区耕地面积少,居民为了发展经济效益,大量的对山地进行开垦,过度开发山坡地破坏了库区内原有植被,使原生植被覆盖降低,加剧了库区内水土流失。2010 年 9 月 21 日“凡亚比”强台风造成集水区七个镇出现特大暴雨,持续强降雨使马贵、大坡、古丁等镇出现大范围的山体滑坡,诱发了特大山洪和泥石流灾害。

高州水库集水区是对气候变化极其敏感的区域,且地形复杂、降雨强烈、灾害类型复杂且空间尺度小,应对未来气候变化下的灾害具有很大的挑战。为了提高应对极端天气的影响,提出如下建议:首先,加强集水区内水土流失治理,开展封山育林和封山护林,推广生态公益林建设;合理控制开发强度,依法禁止在坡度 25° 以上的陡坡地以及水土流失严重、生态脆弱的地区毁林开荒及顺坡耕作,对坡度过陡且无法进行生态改造的果园及一些生态脆弱地区实施“退果还林”;对集水区生态破坏严重、不宜居住的地区实行生态移民。其次,加强集水区内水环境保护,加强区域环境综合整治,推进集水区内点源和面源污染整治工程,保障水库

供水安全。最后,加强区域防灾减灾能力建设,提高灾害预警和防范能力。

4 结论

(1) 灾害发生后集水区归一化植被指数 (NDVI) 降低,植被覆盖度呈下降趋势,灾后集水区内高植被覆盖转出面积大于转入面积,发生转变的面积为 58.8 km²,且主要转变为中植被覆盖区域,高植被覆盖区面积共减少 42.88 km²;中植被覆盖区面积增加 37.35 km²,而无植被及低植被覆盖面积变化不大。

(2) 灾后高州水库水质短时间内发生了较大变化,DO、pH、SD、COD_mn、Chl. a 含量降低;水体浊度、TN、NO₃-N、NH₄-N、TP、Fe 浓度升高;入库河流古丁河浊度和 Fe 浓度升幅最大,浊度从 17.70 NTU 上升至 374.40 NTU,升高 22 倍,Fe 浓度从 0.017 mg/L 上升至 1.926 mg/L,超出地表水标准限值 6.4 倍。

(3) 灾后水库供水口处水温、DO 和 pH 含量随着水深的增加均呈现降低的趋势,浊度、NH₄-N、NO₃-N、

TP、Fe、Mn 浓度随着水深的增加逐渐增大,底层 TP、TN 含量超过地表水Ⅲ类标准,底层 Fe 浓度超出标准限值 0.3 mg/L,严重影响供水安全。

(4)高州水库集水区地形复杂、降雨强烈、面临的灾害类型复杂且空间尺度小,应对未来极端气候变化下的灾害具有很大的挑战。因此,评估台风强降雨引发的特大洪灾及泥石流对集水区内陆生植被及水库水环境质量的影响,结合区域社会经济发展与人类活动干扰状况,提出应对极端气候台风强降雨的环境管理对策,为未来区域减灾防灾与保障供水安全提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆,杨扬,等. 气候变化对中国水安全的影响研究[J]. 气候变化研究进展,2008,4(5): 290-295.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, YANG Yang, et al. The possible impacts of climate change on water security in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(5):290-295.
- [2] Nagao S, Kanamori M, Ochiai S, et al. Export of 134Cs and 137Cs in the Fukushima river systems at heavy rains by Typhoon Roke in September 2011[J]. Biogeosciences, 2013, 10(10):6215-6223.
- [3] Fukunaga H, Irie S, Yamaguchi M. The emergency warnings for typhoon Neoguri and evacuation information in Okinawa: how municipalities responded [J]. Nhk Monthly Report on Broadcast Research, 2014, 64(11):2-27.
- [4] Vigdor J L. The economic after math of hurricane Katrina[J]. Journal of Economic Perspectives, 2008, 22(4): 135-154.
- [5] Lempert K D. Hurricane sandy as a kidney failure disaster[J]. American Journal of Kidney Diseases, 2013,61(6):865-868.
- [6] Cranmer H H, M D, M P H, et al. Typhoon Haiyan and the professionalization of disaster response[J]. The New England Journal of Medicine, 2014, 370(13):1185-1187.
- [7] 薛建军,李佳英,张立生,等. 我国台风灾害特征及风险防范策略[J]. 气象与减灾研究, 2012,35(1): 59-64.
XUE Jianjun, LI Jiaying, ZHANG Lisheng, et al. Characteristics of typhoon disasters in China and risk prevention strategies[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2012,35(1):59-64.
- [8] 陈联寿,端义宏,宋丽莉,等. 台风预测及其灾害[M]. 北京:气象出版社,2012.
- CHEN Lianshou, DUAN Yihong, SONG Lili, et al. Typhoon forecast and its disaster[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [9] 黄炜敏,喻刻,李剑. 强台风、强热带风暴等极端天气下的地质灾害成因分析及防灾对策初探[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):115-117.
HUANG Weimin, YU Ke, LI Jian. Cause analysis of geological disasters in extreme weather of strong tropical storm and countermeasures for disaster prevention [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2008, 19(4):115-117.
- [10] Liou Y C, Wang T C C, Tsai Y C, et al. Structure of precipitating systems over Taiwan's complex terrain during Typhoon Morakot (2009) as revealed by weather radar and rain gauge observations [J]. Journal of Hydrology, 2013, 506: 14-25.
- [11] Wang C C, Kuo H C, Yeh T C, et al. High-resolution quantitative precipitation forecasts and simulations by the Cloud-Resolving Storm Simulator (cress) for Typhoon Morakot (2009) [J]. Journal of Hydrology, 2013,506(49): 26-41.
- [12] Wu J H, Chen J H, Lu C W. Investigation of the Hsien-du-Shan rock avalanche caused by typhoon Morakot in 2009 at Kaohsiung county, Taiwan [J]. Continental Shelf Research, 2013, 60(2): 148-159.
- [13] Lin C W, Chang W S, Liu S H, et al. Landslides triggered by the 7 August 2009 Typhoon Morakot in southern Taiwan [J]. Engineering Geology, 2011, 123(1-2): 3-12.
- [14] Jan C D, Hsu Y C, Wang J S, et al. Debris flows and landslides caused by Typhoon Morakot in Taiwan [J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment,2011,14: 675-683.
- [15] Wu C H, Chen S C, Chou H T. Geomorphologic characteristics of catastrophic landslides during typhoon Morakot in the Kaoping Watershed, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2011, 123(1-2):13-21.
- [16] Juang C H. Reconnaissance of extreme natural disasters of Morakot Typhoon, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2011, 123(1/2): 1-2.
- [17] Tsou C Y, Feng Z Y, Chigira M. Catastrophic landslide induced by Typhoon Morakot, Shialin, Taiwan [J]. Geomorphology, 2011, 127(3): 166-178.
- [18] 陈鸿志,苏志满,徐林荣,等. 2013 年尤特台风诱发广乐高速公路泥石流活动特征及危害[J]. 自然灾害学报,2016,25(1):65-73.
CHEN Hongzhi, SU Zhiman, XU Linrong, et al. Characteristics and damage of debris flow events along

- Guangle Expressway during Typhoon Utor, 2013 [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 65–73.
- [19] John C, Rodgers III, Adam W, et al. Cooke the impact of Hurricane Katrina on the coastal vegetation of the weeks bay reserve, Alabama from NDVI [J]. Data Estuaries and Coasts, 2009, 32(3): 496–507.
- [20] 邓睿, 黄敬峰. “莫拉克”台风引起的滑坡泥石流灾害 HJ-1 图像遥感监测研究 [J]. 国土资源遥感, 2011(1): 106–109.
- DENG Rui, HUANG Jingfeng. The monitoring of landslide and debris flow cause by Typhoon Morakot based on HJ-1 images [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2011(1): 106–109.
- [21] 范章怀, 查轩. 重要水源地东圳水库水质变化及其影响因素研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 25–29.
- FAN Zhanghuai, ZHA Xuan. State of water quality and its influencing factors in Dongzhen Reservoir [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 25–29.
- [22] Bryan P P, Megan K P. The effect of Hurricane Katrina on nekton communities in the tidal freshwater marshes of Breton Sound, Louisiana, USA [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2009, 83(1): 97–104.
- [23] Siswanto E, Morimoto A, Kojima S. Enhancement of phytoplankton primary productivity in the southern East China Sea following episodic typhoon passage [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(11): 192–200.
- [24] Michael S W, Hans W P. Estuarine phytoplankton responses to hurricanes and tropical storms with different characteristics (trajectory, rainfall, winds) [J]. Estuaries and Coasts, 2008, 31(2): 419–429.
- [25] 刘玉函, 唐晓春, 宋丽莉. 广东台风灾情评估探讨 [J]. 热带地理, 2003, 23(2): 119–122.
- LIU Yuhan, TANG Xiaochun, Song Lili. A discussion about the typhoon disaster evaluation of Guangdong [J]. Tropical Geography, 2003, 23(2): 119–122.
- [26] 唐晓春, 刘会平, 潘安定, 等. 广东沿海地区近 50 年登陆台风灾害特征分析 [J]. 地理科学, 2003, 23(2): 182–187.
- TANG Xiaochun, LIU Huiping, PAN Anding, et al. Analysis of disastrous features of landing typhoon in coastal regions of Guangdong Province in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 182–187.
- [27] 陈修康, 郭跃华, 冯喻, 等. 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例 [J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 137–146.
- CHEN Xiukang, GUO Yuehua, FENG Yu, et al. Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: a case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(1): 137–146.
- [28] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 88–671.
- State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 88–671.
- [29] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 60–310.
- DENG Shubin. The processing method of ENVI remote sensing image [M]. Beijing: Science Press, 2014: 60–310.
- [30] 罗慧芬, 苗放, 叶成名, 等. 汶川地震前后茂县植被覆盖度变化研究 [J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 202–205.
- LUO Huifen, MIAO Fang, YE Chengming, et al. Vegetation coverage change of Maoxian County before and after Wenchuan Earthquake [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 202–205.
- [31] Leung Y K, Wu W C, Yeung K K. Recent decline in typhoon activity in the South China Sea [J]. International Conference on Climate Change, 2007: 29–31.
- [32] 薛俊刚. 吉林长白山国家级自然保护区风灾区植被恢复情况调查 [J]. 国土与自然资源研究, 2009(1): 95–96.
- XUE Jungang. Investigation about vegetation restoration at typhoon ruined area in Jilin Changbai Mountain National Nature Reserve [J]. Territory & Natural Resources Study, 2009(1): 95–96.
- [33] 刘少军, 张京红, 蔡大鑫, 等. Landsat 8 在橡胶林台风灾害监测中的应用 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(2): 53–58.
- LIU Shaojun, ZHANG Jinghong, CAI Daixin, et al. Application of Landsat 8 in monitoring of rubber plantation typhoon disaster [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 53–58.
- [34] Ding V Q, Qin B Q, Zhu G W, et al. Effects of typhoon Morakot on a large shallow lake ecosystem, Lake Taihu, China [J]. Ecohydrol, 2012, 5(6): 798–807.
- [35] 胡清凤, 韦莲英. 邕江“江英”80 洪水污染分析 [J]. 水资源保护, 2003, 19(4): 36–37.
- HU Qingfeng, WEI Lianying. Analysis of flood pollution in Yongjiang River in “01·7” [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(4): 36–37.