

青藏高原地区典型公路路域水环境特征

胡林^{1,3}, 王琦¹, 单永体¹, 尹静¹, 陈济丁², 孔亚平²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 交通运输部科学研究院
北京 100029; 3. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: [目的] 阐明青藏高原地区公路路域水环境特征及影响因素, 为青藏高速公路建设及水环境保护措施提供理论基础及科学依据。[方法] 基于 2015 年 6—7 月对共玉公路(青海省共和县至玉树县)和青藏公路(格尔木市至拉萨市)路域水环境测试结果, 对青藏高原地区公路路域水环境特征及影响因素进行分析。[结果] 经 T 检验, 青藏高原地区公路路域径流污染具有显著性差异, 各水质指标存在不同程度的变异性, 变异系数(C_v)变化范围为 11%~396%, 表明不同径流水体污染物因所处位置不同而有所差异; 对比了典型路域水环境特征, 新建公路(共玉公路)的水环境质量好于运营期公路(青藏公路), 高速公路运营后对路域水环境影响明显; 对不同径流水体进行了 Person 检验。结果显示, 悬浮物(SS)与其他水质参数之间均表现出不同程度的相关性, 说明 SS 不仅是青藏高原地区路域径流污染的主要污染物, 且是其他污染物(重金属和化学需氧量 COD)的载体。[结论] 路面径流是路域水环境污染的重灾区, 对降雨径流进行收集处理及采用新型的路面, 布置径流处理措施, 将有效地降低路域水环境的影响。

关键词: 青藏高原; 公路路域; 水环境; 相关关系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0286-06

中图分类号: X52, X734

文献参数: 胡林, 王琦, 单永体, 等. 青藏高原地区典型公路路域水环境特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):286-291. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.050; Hu Lin, Wang Qi, Shan Yongti, et al. Characteristics of water environment at road area of typical highway in Qinghai Tibet Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):286-291. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.050

Characteristics of Water Environment at Road Area of Typical Highway in Qinghai Tibet Plateau

HU Lin^{1,3}, WANG Qi¹, SHAN Yongti¹, YIN Jing¹, CHEN Jiding², KONG Yaping²

(1. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China; 3. State Key Laboratory

Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The objective of the study is to investigate the characteristics of water environment and influencing factors at road area of highway in the Qinghai Tibet Plateau, and to provide theoretical basis and scientific support for the construction of the Qinghai Tibet highway and water environmental protection measures. [Methods] Based on the test results of water environment along Gongyu highway(from Gonghe to Yushu County in Qinghai Province) and Qinghai Tibet highway(from Geermu to Lhasa City) in June to July of 2015, we analyzed water environment characteristics and influencing factors in highway road area in Qinghai Tibet Plateau. [Results] Statistic test showed that the significant differences existed in runoff water pollution in highway road area of the Qinghai Tibet Plateau, and high variability was found in the water quality indexes, with coefficient of variation(C_v) ranging from 11% to 396%, indicating that pollutant in runoff varies by location. We also compared water environment characteristics in typical highway areas, and found that water environment quality was better in new highway area than old highway area. The highway operation had a significant impact on water environment. Person test showed that runoff water, suspended solids

收稿日期: 2016-06-03

修回日期: 2016-07-04

资助项目: 国家科技支撑计划项目“高海拔高寒地区高速公路建设环境保护技术”(2014BAG05B06)

第一作者: 胡林(1986—), 男(汉族), 陕西省西乡县, 博士, 工程师, 主要从事公路环境保护与土壤侵蚀研究。E-mail: 27430166@qq.com。

(SS) and other water quality parameters was correlated with each other to a certain degree, indicating that SS was not only the main pollutants of runoff in the Qinghai Tibet Plateau region, but also is the carrier of other pollutants, including the heavy metals and chemical oxygen demand(COD). [Conclusion] Road runoff is the main source of the water pollution in road area, collection and treatment of road runoff and the use of new pavement will effectively reduce the impact of highway on water environment in the highway area.

Keywords: Qinghai Tibet Plateau; highway area; water environment; relationship

公路路域径流污染是指在降水过程中雨水、融雪过程形成的径流、壤中流在公路路面及边坡汇流和下渗过程中携带的污染物质,包括悬浮物(SS),化学需氧量(COD),P,重金属、多环芳香烃和氯化物等,排入路域自然水体而造成的水体污染。青藏高原属典型的高山高原气候,水系发达,是长江、黄河、澜沧江的三江源头^[1],国家重点水源保护区,具有水环境敏感、水体保护等级高、冻融频繁的特点^[2]。伴随公路交通事业的发展,该地区的公路建设势必迎来建设高潮,对于公路环境保护而言,路域径流产生的点源和非点源污染成为亟需解决的问题。笔者针对青藏地区公路沿线水环境进行了调查,该地区公路等级普遍较低,缺乏相关水环境保护措施,路域径流以直排为主;针对青藏高原地区公路路域水环境特征及影响因素却鲜有报道,为了保障国家重大工程青藏高速公路建设的顺利实施,从环境影响与环境保护的角度,亟需展开青藏高速公路走廊带水环境及污染物排放特征研究,论证公路对水环境的影响并提出合理可行的环境保护措施。本文拟对共玉公路(青海省共和至玉树县)和青藏公路(格尔木至拉萨)走廊带径流水体进行了采样分析,旨在阐明青藏高原地区公路路域水环境特征及影响因素,以期为青藏高速公路建设及水环境保护措施提供理论基础及科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取青藏高原地区两条典型公路路域,分别是青海省共和至结古(玉树)公路 1 期工程(新建公路)以及国道 109 公路格尔木至拉萨段(运营期公路),均位于青藏高原腹地,相距约 450 km,地形地貌条件相似。青海省共和至结古(玉树)公路 1 期工程于 2011 年 5 月开工建设,1 期工程于 2014 年年底建成通车,公路路基宽度 24.5 m,路面为沥青混凝土路面,径流系数为 0.9,该工程与 G214 青海省共和至玉树段公路为同一走廊内伴行,路基边坡布置植物措施以铺草皮、三维网植草措施为主;国道 109 公路格尔木至拉萨段(即青藏公路)于 1950 年动工,1954 年通车,为 2 级公路标准,路基宽 10 m,路面为沥青路面,路基边坡以自然恢复植被为主。采样区位于青藏高原腹地,

平均海拔 4 500~4 900 m,气候属典型的高原大陆性半干旱气候,冬季气候寒冷漫长,多风雪,夏季气候凉爽短促,雨水较充足;降水分布地区差异明显,降水量随海拔的抬升呈增加趋势,主要集中在 5—9 月,年平均降水量 300 mm 左右,年平均气温 -4°C ,植被类型以嵩草草甸为主,主要优势种是小嵩草、矮嵩草等,主要伴生种有异针茅等,土壤类型主要是高山草甸土、高山灌丛草甸土及沼泽土。

1.2 采样及分析方法

采样于 2015 年 6 月 20 日至 7 月 10 日之间进行,采样期间未发生降雨事件,采样点路面平整。路面径流:路面低洼处及破损处积水;路侧积水:公路走廊带两侧的积水;路测河流:与公路路线伴行河流及交叉河流。采样点共计 64 处。共玉公路采样长度为 500 km,共采集水样 24 处,其中路面水样 4 处、路侧水样 15 处、河流水样 5 处;青藏公路采样长度为 1 500 km,采集水样 40 处,其中路面水样 11 处、路侧水样 13 处、河流水样 16 处。

本研究水环境分析项目包括:温度,溶解氧(DO), E_c (电导率),pH 值,氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$),悬浮物(SS),化学需氧量(COD),Pb。其中温度、溶解氧、电导率、pH 值、氨氮指标使用 Proplus YSI 多功能水质分析仪(美国)现场测定,SS, COD, 重金属铅 Pb 用聚乙烯瓶装采集,遮光保存,送回实验室分析测定,SS 的测定用称量法, COD 采用重铬酸盐法, Pb 测定用原子吸收分光光度法。应用 SPSS 21.0 统计软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 路域污染物特征分析

表 1 为路域径流污染物数据统计特征,经 T 检验($p < 0.05$)发现径流污染存在着具有显著性差异。路面积水中 DO, $\text{NH}_3\text{-N}$, COD, SS, Pb, pH 及 E_c 的平均浓度为 5.79, 0.95, 316.16, 0.03, 1 171.95, 7.96 及 747.63 mg/L, DO, $\text{NH}_3\text{-N}$, Pb 均未超过国家地表水环境质量 III 类标准, COD 超过国家地表水环境质量 V 类标准, SS 超过排放水 3 级标准, 总体达到国家地表水环境质量 III 类标准。污染特征指标与广州、北

京等地有明显的差异,甘华阳^[3]研究表明:广州省城市道路广州城市道路雨水径流中的石油类、COD、悬浮固体和 Pb 等指标都大大超过Ⅲ类标准;荆红卫^[4]研究表明:北京北运河从城市中心区河流到近郊区城市排水河流再到远郊区干支流,水质污染不断加重,从Ⅲ类到劣Ⅴ类。通过表 1 可知,青藏高原地区路域径流污染物中 SS 含量较高,其次为 COD, NH₃-N, DO, Pb, 含量较低。

经过 $T(p=0.05)$ 检验,各项指标之间均存在差异性显著 ($\text{sig.} < 0.05$)。变异系数 (coefficient of variation, C_v) 可以用来定量确定空间变异的程度:弱变异 $C_v \leq 10\%$, 中等变异 $10\% < C_v < 100\%$, 强变异 $C_v \geq 100\%$ ^[5]。DO, Pb, pH 值及 E_c 的 C_v 值分别是 23%, 71%, 11% 及 95%, 为中等变异, NH₃-N, COD 及 SS 的 C_v 值分别是 126%, 396% 及 270%, 为强变异, 说明不同污染物指标因水体所处位置有所差别。

表 1 研究区路域径流水体污染物统计特征

| 污染物 | 样本数 (N) | 标准差 (SD) | 标准误 (SE) | 变异系数 (C_v) | T 检验 (t) | 显著性 (sig.) | 平均值 | 最小值 | 中位数 | 最大值 |
|--------------------|---------|----------|----------|----------------|--------------|------------|----------|------|--------|-----------|
| DO | 64 | 1.35 | 0.17 | 23 | 34.38 | 0.000 | 5.79 | 1.42 | 6.20 | 7.84 |
| NH ₃ -N | 64 | 1.20 | 0.15 | 126 | 6.34 | 0.000 | 0.95 | 0.13 | 0.54 | 6.44 |
| COD | 64 | 1 232.44 | 154.06 | 396 | 2.02 | 0.048 | 316.16 | 2.00 | 27.00 | 7 090.00 |
| Pb | 55 | 0.02 | 0.00 | 56 | 11.14 | 0.000 | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.11 |
| SS | 64 | 3 167.67 | 395.96 | 270 | 2.96 | 0.004 | 1 171.95 | 6.00 | 89.00 | 14 200.00 |
| pH 值 | 64 | 0.89 | 0.11 | 11 | 710.19 | 0.000 | 7.96 | 4.22 | 7.94 | 11.43 |
| E_c | 64 | 711.46 | 88.93 | 95 | 34.38 | 0.000 | 747.63 | 7.41 | 554.00 | 4 376.00 |

注:DO 为溶解氧;SS 为悬浮物;COD 为化学需氧量; E_c 为电导率。下同。

2.2 路域不同径流污染物差异

图 1—2 为不同径流水体污染物特征,通过显著性检验,公路路域不同径流水体存在显著性差异 ($p < 0.05$)。路面径流中 NH₃-N, COD, Pb, SS 及 pH 值的浓度显著高于其他径流水体,路面径流污染物主要来源于降雨对路面累积物的冲刷及突发危险品事故,车辆的运行、车辆部件及轮胎磨损、车辆液体泄漏等都直接排在公路路面,路面沉积物是路面径流污染的主要来源,是公路水环境保护的重点防治部位;路侧径流主要包括路侧积水及排水沟水体,路侧积水污染物来源主要为降水及路面径流汇集过程。路面径流中的 DO 均低于河流以及路侧积水,原因是路侧径流以及河流中水生植物的光合作用会增加 DO 含量;但 NH₃-N, COD, SS 含量均明显高于其他径流水体,是由于公路在营运时所产生污染物均直接排放于路面。COD, Pb, SS 以颗粒物的形式存在,在径流的冲刷作用下进入到路侧径流水体以及河流,故 SS, COD, Pb 的浓度较高。青藏公路路面径流 COD, Pb, SS 及 E_c 分别是共玉公路路面径流的 8.10, 1.44, 24.08, 1.87 倍,路侧径流为 2.87, 1.05, 21.29, 1.3 倍,河流水体为 3.58, 1.09, 2.76, 1.71 倍,总体来说,新建公路(共玉公路)的水环境质量好于运营期公路(青藏公路),表明高速公路运营后对路域水环境影响明显,随着交通量的增加,这种影响是长期的、不断累加的,尤其是在水源保护区,应采取相应措施,尽可能

的减小路域水环境污染。值得注意的是:共玉公路路面积水 NH₃-N 含量为青藏公路的 1.39 倍,原因可能是共玉公路为新建公路,采用沥青路面, N 含量高,故造成路面积水 NH₃-N 含量较高。

2.3 不同径流水体污染物相关分析

国内外相关研究中,提出水体中许多污染物与颗粒物的分布存在一定的相似性^[6-7],本文针对不同水体污染物之间的相关性关系进行了 Person 检验,结果显示(表 2)。从路域尺度来看,SS 与 DO 呈极显著负相关 ($p=0.01$),与 COD, E_c 呈极显著正相关 ($p=0.01$),与 Pb 呈显著正相关 ($p=0.05$),表明径流水体中的颗粒物是有机物 COD 及重金属 Pb 的载体,且影响着水体中 DO 的含量。

从不同径流水体来看,水质参数之间的相关性与其所处的位置不同而有所差异;在路面径流,SS 与 COD, Pb 及 E_c 表现出极高的相关性;河流水体中 SS 与 COD 无显著相关性 ($p=0.05$);在路面径流中, COD, Pb, E_c 与 SS 均表现出显著正相关性 ($p=0.01, p=0.05$),在路侧径流中仅表现出 SS 与 COD 呈显著正相关 ($p=0.01$),在河流水体中表现出 SS 与 Pb 成显著正相关 ($p=0.05$)。以上,SS 与其他水质参数之间均表现出不同程度的相关性,说明 SS 不仅是青藏高原地区路域径流污染的主要污染物,也是其他污染物(重金属、COD)的载体,因此通过对 SS 采取拦、蓄、滞、滤等方法降低路域污染物含量,将会

有效的减轻青藏高原地区公路路域水环境的负面影响。

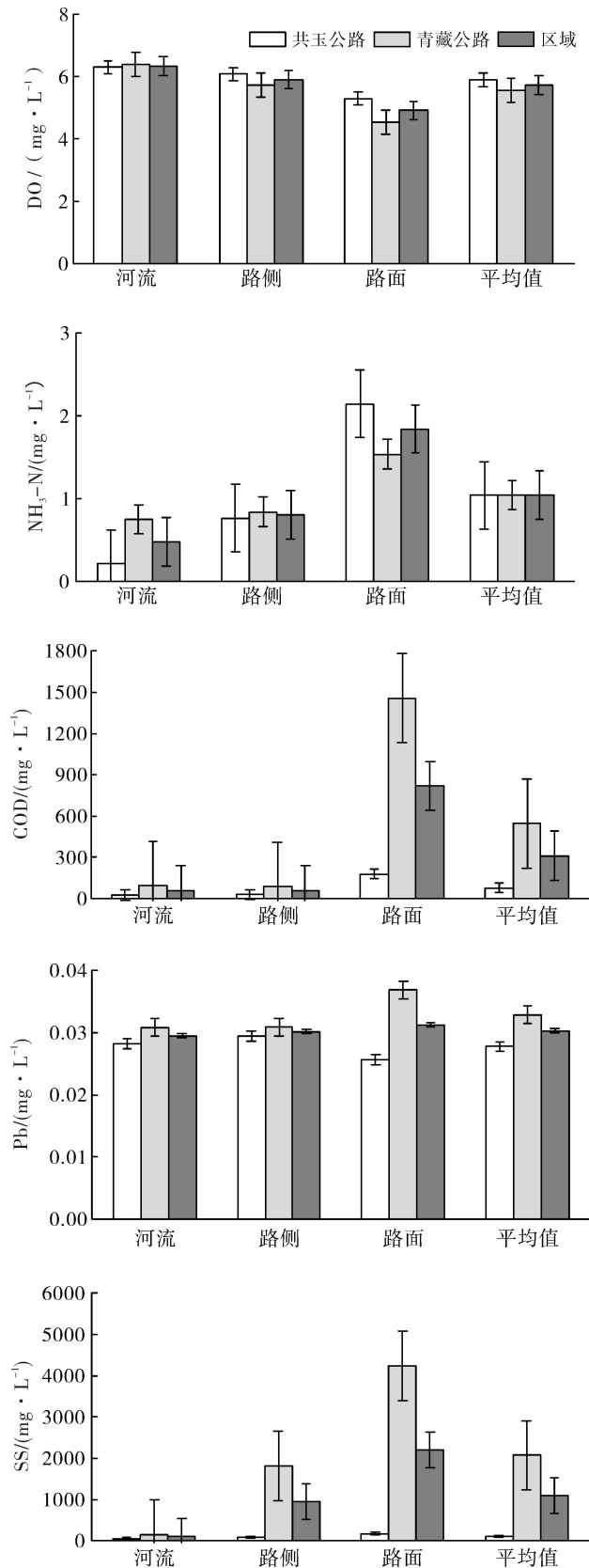


图 1 典型公路路域水体溶解氧(DO), NH₃-N, 化学需氧量(COD), Pb 及悬浮物(SS)特征

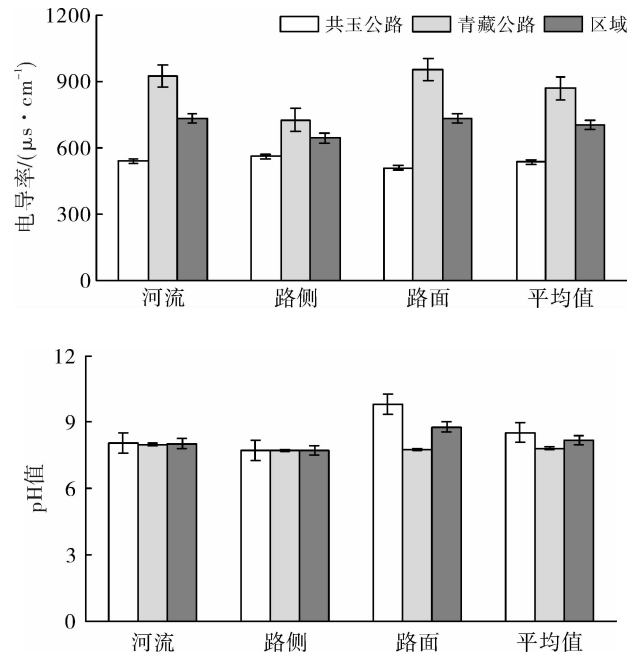


图 2 典型公路路域水体电导率及 pH 值特征

3 讨论

3.1 水环境污染来源

通过对比青藏公路及共玉公路路域水环境污染物质之间的差别。路侧径流、河流水质达到国家地表水环境质量 II 类标准, 总体良好; 但路面径流污染物指标严重超标, 路面径流中 SS 含量最高达到 9 100 mg/L, COD 含量最高达到 6 990 mg/L。表征颗粒物的 SS 和表征有机物的 COD 是表征路面径流污染的 2 项重要指标^[7-9]。可见路面径流是路域水环境污染的重灾区; 原因在于, 公路在营运过程中, 由于机动车辆的通行(车辆尾气排放、车辆机油渗漏、轮胎磨损等)、筑路材料磨损、载有害物质的车辆突发事故等因素, 产生的污染物直接排放在路面上, 导致路面污染; 当发生降雨事件时, 路面径流冲刷携带大量的污染物进入到路域水环境当中; 且在车辆行驶过程中, 产生的灰尘, 伴随着沉降或者降雨进入到边坡、绿化带土壤或地表水体。因此, 路面径流污染防治是路域水环境预防及治理的重点。

3.2 影响因素及对策

3.2.1 降水因素 路域水环境污染属于非点源污染^[10], 路面径流污染是路域污染的重要预防区域, 降雨是路面径流污染的重要影响因素。降雨在路面形成的径流含有相当数量的悬浮颗粒物、重金属和有机污染物, 其未经处理排入受纳水体, 易引发水体富营养化和水生生态系统破坏等^[11], 因此, 路面径流污染

已成为路域水环境污染的重要来源。

为研究径流污染,引出了径流平均浓度(EMC)和初始冲刷(first flush)的概念,即在一次降雨事件中暴雨产生的初期径流携带了大量的污染物^[12],故只需把开始的那部分径流滞留处理,就可以保护路域整体水环境的质量。

Bertrand 等^[13-14]分别分析了 197,117 场降雨事

件之后,提出在最初的 30%的径流中携带了整个降雨事件污染物总量的 80%,截至目前为止,这是最有说服力的解释^[15-17],可以比较准确的定量降雨径流中的污染物含量,然后布置相关的处理措施,诸如:植被控制、渗滤系统、滞留池、人工湿地和沉淀池等措施,对路面径流中污染物进行处理,将会对水环境防治产生积极的影响。

表 2 不同径流污染物参数相关性分析

| 位置 | 指标 | DO | NH ₃ -N | SS | COD | Pb | E _c | pH 值 |
|----|--------------------|----------|--------------------|---------|--------|---------|----------------|-------|
| 路域 | DO | 1.000 | | | | | | |
| | NH ₃ -N | -0.196 | 1.000 | | | | | |
| | SS | -0.642** | 0.253 | 1.000 | | | | |
| | COD | -0.453 | 0.011 | 0.441** | 1.000 | | | |
| | Pb | -0.100 | 0.074 | 0.324* | 0.025 | 1.000 | | |
| | E _c | -0.169 | 0.444** | 0.446** | 0.004 | 0.425** | | |
| | pH 值 | 0.066 | 0.467** | -0.233 | -0.046 | -0.061 | -0.013 | 1.000 |
| 路面 | DO | 1.000 | | | | | | |
| | NH ₃ -N | -0.010 | 1.000 | | | | | |
| | SS | -0.747 | 0.060 | 1.000 | | | | |
| | COD | -0.558 | -0.103 | 0.462* | 1.000 | | | |
| | Pb | -0.123 | 0.201 | 0.653* | -0.038 | 1.000 | | |
| | E _c | -0.277 | 0.490 | 0.724** | -0.038 | 0.854** | 1.000 | |
| | pH 值 | 0.163 | 0.660* | -0.407 | -0.148 | -0.192 | -0.035 | 1.000 |
| 路侧 | DO | 1.000 | | | | | | |
| | NH ₃ -N | -0.178 | 1.000 | | | | | |
| | SS | -0.501 | 0.330 | 1.000 | | | | |
| | COD | -0.737 | 0.027 | 0.775** | 1.000 | | | |
| | Pb | -0.175 | -0.103 | -0.045 | 0.019 | 1.000 | | |
| | E _c | -0.074 | 0.445* | 0.354 | -0.018 | -0.027 | 1.000 | |
| | pH 值 | 0.057 | 0.255 | -0.208 | -0.151 | 0.002 | -0.088 | 1.000 |
| 河流 | DO | 1.000 | | | | | | |
| | NH ₃ -N | -0.430 | 1.000 | | | | | |
| | SS | 0.385 | 0.158 | 1.000 | | | | |
| | COD | 0.363 | -0.033 | 0.480 | 1.000 | | | |
| | Pb | 0.510* | -0.223 | 0.509* | 0.568* | 1.000 | | |
| | E _c | -0.359 | 0.751** | 0.004 | 0.173 | -0.037 | 1.000 | |
| | pH 值 | 0.306 | -0.278 | 0.216 | 0.082 | 0.126 | -0.263 | 1.000 |

注: ** 表示在 0.01 水平下显著相关(双侧); * 表示在 0.05 水平下显著相关(双侧)。

3.2.2 路面类型 Barrett 等^[18]研究表明,相同条件下沥青路面径流中 Zn, COD 和 TOM 的浓度是混凝土路面的 3~5 倍; Stoze^[19]研究表明,多孔沥青路面可以大大降低径流中污染物的浓度; Pagotto C. 等^[20]通过监测 25 场降雨过程中不同类型路面的径流污染物,并计算其排放负荷,发现多孔沥青路面径流中污染物(TSS, 总 Zn 等)浓度及排放总量较普通沥青路面均有显著的降低。可见路面类型对路面径流中污染物的浓度有较大的影响。因此在公路建设

时应采用新型路面材料,增加路面渗流,减小路面径流污染,有利于保护青藏高原地区公路路域水环境。

4 结论

(1) 经 T 检验发现路域径流水土之间存在显著性差异。DO, Pb, pH 值及 E_c 的 C_v 值分别是 23%, 71%, 11% 及 95%, 为中等变异, NH₃-N, COD 及 SS 的 C_v 值分别是 126%, 396% 及 270%, 为强变异, 说明不同径流水体之间因所处位置不同而有所差异。

(2) 新建公路(共玉公路)的水环境质量好于运营期公路(青藏公路),表明高速公路运营后对路域水环境影响明显,随着交通量的增加,这种影响是长期的、不断累加的。

(3) SS 与其他水质参数之间均表现出不同程度的相关性,通过对 SS 采取拦、蓄、滞、滤等方法降低路域污染物含量,将会有效的减轻青藏高原地区公路路域水环境的负面影响。

(4) 路面径流是路域水环境污染的重灾区。对降雨径流进行收集处理,采用新型的路面,布置径流处理措施,将有效的降低对路域水环境的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 王根绪,李元首,吴青柏,等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. 中国科学, 2006,36(8):743-754.
- [2] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报,2013,58(2):115-130.
- [3] 甘华阳,卓慕宁,李定强,等. 广州城市道路雨水径流的水质特征[J]. 生态环境,2006,15(5):969-973.
- [4] 荆红卫,张志刚,郭婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染源分析[J]. 中国环境科学,2013,33(2):319-327.
- [5] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability: Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas, Nev., USA, 1984[M]. Wageningen: Pudoc. 1985.
- [6] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. 中国环境科学,2011,31(5):781-788.
- [7] Gromaire M C, Garnaud S, Saad M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research, 2001,35(2):521-533.
- [8] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学,2008,29(3):607-612.
- [9] Furumai H, Balmer H, Boller M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff[J]. Water Science Technology, 2002, 46(11/12):413-418.
- [10] 陈莹,赵剑强,胡博. 西安市城市主干道路面径流污染及沉淀特性研究[J]. 环境工程学报,2011,5(2):331-336.
- [11] 李贺,张雪,高海鹰,等. 高速公路路面雨水径流污染特征分析[J]. 中国环境科学,2008,28(11):1037-1041.
- [12] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理[J]. 水科学进展,2006,17(2):181-185.
- [13] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon[J]. Water Research, 1998,32(8):2341-2356.
- [14] Saget A, Chebbo G, Bertrand-Krajewski J L. The first flush in sewer systems[J]. Water Science and Technology, 1996,33(9):101-108.
- [15] Li Qing, Cheng Qing, Qing Ci, et al. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007,19(3):295-299.
- [16] Luo Hongbing, Luo Lin, Huang Gu, et al. Total pollution effect of urban surface runoff[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009,21(9):1186-1193.
- [17] 王书敏,郭树刚,何强,等. 城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象[J]. 环境科学研究,2015,28(4):532-539.
- [18] Barrett M E, Irish L B, Malina J F, et al. Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998,124(2):131-137.
- [19] Stotz G. Investigations of the properties of the surface water runoff from federal highways in the FRG[J]. The Science of the Total Environment, 1999, 59:329-337.
- [20] Pagotto C, Legret M, Le Cloirec P. Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement[J]. Water Research, 2000,34(18):4446-4454.

(上接第 285 页)

- [14] 汪澜. 水泥生产企业 CO₂ 排放量的计算[J]. 中国水泥, 2009(11):21-22.
- [15] 吴庆标,王效科,段晓男,等. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):517-524.
- [16] 赵先贵,韦良焕,马彩虹,等. 西安市生态足迹与生态安全的动态研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(1):2-5.
- [17] 邱高会. 区域碳安全评价及预测研究[J]. 生态经济, 2014,30(8):14-17,41
- [18] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2001—2015 [M]. 乌鲁木齐:中国统计出版社,2001-2015.
- [19] 纪芙蓉. 陕西省能源利用碳足迹与植被碳承载力研究 [D]. 西安:陕西师范大学,2012.
- [20] 魏媛,蔡绍洪,王名绍. 贵州喀斯特山地碳足迹和植被碳承载力动态研究[J]. 生态经济,2016,32(2):172-176.
- [21] 朱莉莎,赵先贵,吴宜珊,等. 天水市碳安全评价及预测 [J]. 陕西农业科学,2013(3):204-208.
- [22] 郭鹏程,包安明. 基于生态压力指数的新疆生态安全时空动态分析[J]. 中国沙漠,2012,32(1):235-243.