

中国河流入海颗粒态碳通量及其变化特征

朱先进^{1,2}, 于贵瑞¹, 高艳妮^{1,2}, 王秋凤¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室 CERN综合研究中心, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 河流是连接海洋和陆地两大碳库的纽带, 其碳通量是全球碳循环的重要环节。本文以《中国河流泥沙公报》的数据为基础, 就中国河流入海颗粒态碳通量及其变化特征进行分析。结果表明: 1965-2005年, 中国河流入海颗粒态碳通量平均为 $29.57 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$, 占河流入海碳通量的42%, 其中有机碳占36.02%, 无机碳占63.98%, 长江、黄河和珠江的颗粒态碳通量占全国河流入海颗粒态碳通量的96.25%。从2003年开始, 河流入海颗粒态碳通量呈逐年递减的趋势, 但颗粒态有机碳通量在河流入海颗粒态碳通量中所占的比重有所提高。2009年, 全国通过河流泥沙输送到海洋中的碳仅为 6.59 TgC , 为1965-2005年平均输碳量的22.3%。由此可见, 颗粒态碳通量在河流碳通量中占有不可忽视的地位, 为了准确评估中国河流及陆地生态系统的碳收支, 应对颗粒态碳通量进行细致研究。

关键词: 颗粒态有机碳; 颗粒态无机碳; 通量; 碳循环; 土壤侵蚀; 中国

1 引言

河流作为连接海洋和陆地两大碳库的纽带, 其碳通量是全球碳循环中的重要环节。全球每年河流碳通量约为 1 PgC , 其中约60%为无机碳、40%为有机碳^[1]。河流碳通量由4种赋存状态组成, 即溶解态有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、溶解态无机碳(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)、颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)、颗粒态无机碳(Particulate Inorganic Carbon, PIC)^[2]。了解河流碳通量各个组分的特征有助于充分认识河流的碳通量状况, 并为理解全球碳循环过程提供基础。

大规模的河流碳循环研究始于1980年, 已有学者对各国主要河流的碳通量特征进行了分析^[1]。在中国, 相关研究人员已就长江、黄河、珠江等河流中的溶解态有机碳和溶解态无机碳的通量特征开展了大量工作。结果发现, 长江、黄河的入海溶解态有机碳通量分别为 $1.8 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $0.06 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[3], 珠江的入海溶解态有机碳通量为 $0.38 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[4]; 长江的入海溶解态无机碳通量为 $18.6 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[3], 也有研究认为该值为 $19.5 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[5], 黄河、珠江、西江入

海溶解态无机碳通量分别为 $1.67 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[3]、 $5.7 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[6]和 $4.57 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[7]。Cauwet 和 Mackenzie^[3]和 Ni 等^[4]发现长江、黄河和珠江的入海颗粒态有机碳通量分别为 $4.5 \sim 6.0 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $4.5 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ 和 $0.54 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。但关于颗粒态无机碳通量的研究还仅在长江和黄河中开展^[3]。由此可见, 中国河流碳通量的研究主要集中于长江、黄河、珠江3条河流中, 同时, 还仅对河流碳通量的个别组分开展了分析工作, 这使得中国河流碳通量的估算存在一定的不确定性。另外, 河流入海碳通量的年际变化趋势也少有人问津。

颗粒态有机碳和颗粒态无机碳构成河流颗粒态碳, 是河流碳通量的重要组成部分, 主要以悬移质为介质进行传输。在《中国河流泥沙年报》中, 河流的悬移质(Total Suspended Sediment, TSS)用输沙量来描述, 因而本文基于《中国河流泥沙年报》公布的输沙量和径流量数据, 就中国河流入海颗粒态碳通量的特征及其变化趋势进行分析, 并就其在河流碳通量和土壤水蚀碳通量中所占的比重进行阐述, 希望能为中国陆地生态系统的碳收支估算及过程分析提供数据支撑。

收稿日期: 2011-10; 修订日期: 2012-01.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050601); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB833504); 国家自然科学基金项目(31061140359, 30590380); 中国科学院地理科学与资源研究所自主部署项目(200903007)。

作者简介: 朱先进(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事生态系统碳水循环及其相互关系研究。E-mail: xianjin1985@163.com

通讯作者: 于贵瑞(1959-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为生态系统碳循环与全球变化。E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

2 材料与方法

2.1 数据来源

本文数据主要来源于中华人民共和国水利部公布的《中国河流泥沙公报》^[8-11]。当前公开获取的主要是1965-2005年的多年平均值及2001年以后的数据。然而,2001和2002年在个别观测站的数据没有公布,因而本文选用了1965-2005年的多年平均值对河流入海颗粒态碳通量特征进行分析,选用2003-2009年的数据分析河流入海颗粒态碳通量的变化趋势。

本文重点关注通过河流输送入海的颗粒态碳通量的特征,因而,选择各大河流中最接近入海口的站点数据进行分析。各入海河流所选择的观测站点、多年平均径流量、年输沙量和年平均含沙量如表1所示。

2.2 颗粒态碳通量的计算

颗粒态碳由颗粒态有机碳(POC)和颗粒态无机碳(PIC)组成,因而颗粒态碳通量(Flux of Particulate Carbon, FPC)由颗粒态有机碳通量(Flux of POC, FPOC)和颗粒态无机碳通量(Flux of PIC, FPIC)构成,即:

$$FPC = FPOC + FPIC \quad (1)$$

FPOC采用悬移质中有机碳含量(POC%)与年悬移质(TSS)相乘得到,即:

$$FPOC = TSS \times POC\% \quad (2)$$

由于《中国河流泥沙公报》中的年输沙量即为悬移质(TSS),因而只需计算POC%即可确定FPOC。POC%通常用经验公式来计算^[1],即:

$$POC\% = -0.16(\log C_{TSS})^3 + 2.83(\log C_{TSS})^2 - 13.6(\log C_{TSS}) + 20.3 \quad (3)$$

式中: C_{TSS} 指单位体积的河流中悬移质含量即含沙量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

但该方程仅适用于 C_{TSS} 小于 $2250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的河流中^[2],因而除黄河外的其他河流,均采用方程计算POC%。黄河的 C_{TSS} 高达 $24830 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表1),故该方程在黄河流域不能适用。张龙军等^[12]通过实测数据发现,黄河入海口悬移质中POC的含量为0.51%,并且年际之间变异较小,因而,本文将黄河的POC%设为0.51%。

中国河流颗粒态无机碳通量(FPIC)一直没有进行深入分析。与FPOC的计算方法相同,本文采用悬移质中无机碳含量(PIC%)和年悬移质(TSS)相

表1 本文中主要河流的观测站点及流量信息

Tab.1 Observation sites used in this paper and basic information of their river discharges

河流	站点	平均径流量 /亿 m^3	年输沙量 /亿 t	平均含沙量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
长江	大通	9034	4.14	458.27
黄河	利津	313.3	7.78	24832.43
淮河	蚌埠、临沂	290.68	0.12	403.88
海河	海河闸	8.12	0.0008	102.55
珠江	高要、石角、博罗	2849.4	0.76	266.27
松花江	佳木斯	653.4	0.13	194.37
辽河	六间房	30.29	0.05	1591.28
钱塘江	兰溪、花山、诸暨	200.15	0.03	134.75
闽江	竹歧、永泰	573.9	0.07	114.38

注:①表中数据为各站点20世纪60年代至21世纪初的多年平均值(1965-2005年);②数据来源:《中国河流泥沙公报》^[8-11]。

乘得到FPIC,即:

$$FPIC = TSS \times PIC\% \quad (4)$$

在式(4)中,PIC%是获取FPIC的关键,当前仅在个别河流中获取了该数值,如Cauwet和Mackenzie^[3]发现,长江和黄河中PIC%分别为1%和1.7%,张龙军等^[12]发现,黄河中PIC%为1.75%,与Cauwet和Mackenzie^[3]的结果相似。因而,将长江和黄河的PIC%设为1%和1.75%。由于长江和黄河的悬移质占到全国入海河流的91.13%,而PIC主要来源于未溶解的碳酸盐矿物,因而,其他河流PIC%的估算误差不会对全国河流FPIC产生明显的影响,所以假定其他河流中的PIC%为1%。

3 结果与分析

3.1 中国河流入海颗粒态碳通量特征

中国河流入海颗粒态碳通量特征如表2所示。从表2可以看出,中国河流入海颗粒态有机碳通量(FPOC)为 $10.65 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$,其中以长江为最高约 $4.7 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$,其后依次为黄河($3.97 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$)、珠江($1.28 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$),这3条河流的FPOC占到全国颗粒态有机碳通量的93.3%。

中国河流入海颗粒态无机碳通量(FPIC)为 $18.916 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$,其中,黄河由于具有极高的输沙量,其FPIC达到 $13.615 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$,占全国FPIC的72%,其次为长江,可以达到 $4.14 \text{ TgC} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。长江和黄河的颗粒态无机碳通量之和占全国FPIC的90%。

中国河流入海颗粒态碳通量(FPC)为 29.57

表 2 中国河流入海颗粒态碳通量特征

Tab.2 Characteristics of particulate carbon fluxes from rivers to the ocean in China

河流	FPOC /TgC·yr ⁻¹	FPIC /TgC·yr ⁻¹	FPC /TgC·yr ⁻¹	FPIC/ FPOC
长江	4.696	4.140	8.836	0.882
黄河	3.968	13.615	17.583	3.431
淮河	0.147	0.120	0.267	0.816
海河	0.003	0.001	0.003	0.333
珠江	1.275	0.760	2.035	0.596
松花江	0.266	0.130	0.396	0.489
辽河	0.025	0.050	0.075	2.000
钱塘江	0.074	0.030	0.104	0.405
闽江	0.195	0.070	0.265	0.359
总计	10.650	18.916	29.565	1.776

注: FPOC: 颗粒态有机碳通量; FPIC: 颗粒态无机碳通量; FPC: 颗粒态碳通量, FPC=FPIC+FPOC。

TgC·yr⁻¹, 有机碳占 36.02%, 无机碳占 63.98%, 无机碳占主导地位, 与全球河流碳通量中两者所占的比重^[1]相似。不同河流间以黄河为最大, 达到 17.58 TgC·yr⁻¹, 其次分别为长江(8.84 TgC·yr⁻¹)和珠江(2.04 TgC·yr⁻¹)。这 3 条河流的通量占全国入海颗粒态碳通量的 96.25%。

不同河流中颗粒态有机碳和无机碳所占的比例(FPIC/FPOC)有所不同, 多数河流中有机碳所占的比例高于无机碳, 这在南方河流中尤为明显。黄河和辽河中无机碳所占比例较大, FPIC/FPOC 分别为 3.43 和 2.00。

本文估算的长江和黄河的入海颗粒态碳通量与 Cauwet 和 Mackenzie^[3]的结果较为接近, 但珠江 FPOC 估算结果明显高于 Ni 等^[4]的数值, 这与所使用的数据年份不同有关, 本研究中所使用的年输沙量为《中国河流泥沙公报》1965-2005 年的平均值, 而 Ni 等^[4]所使用的数据为 2005-2006 年的结果, 前者明显高于后者。

3.2 河流入海颗粒态碳通量占河流入海碳通量比重

河流入海碳通量(Flux of Carbon, FC)是溶解态有机碳通量(FDOC)、溶解态无机碳通量(FDIC)、颗粒态有机碳通量(FPOC)、颗粒态无机碳通量(FPIC)的和, 即:

$$FC = FDOC + FDIC + FPOC + FPIC \quad (5)$$

方精云等^[13]利用碳运输的区段模型, 估算了我国内河流每年的碳输运量, 其中入海碳通量为 70.39 TgC·yr⁻¹。徐嵩龄等^[14]估算的黄河入海碳通

量(FC)为 24.52 TgC·yr⁻¹, 也有分析表明, 黄河的 FC 为 21.23 TgC·yr⁻¹[3], 长江和珠江的 FC 分别为 30.7 TgC·yr⁻¹[3]和 8.01 TgC·yr⁻¹[15]。因而, 可以初步统计, 长江、黄河、珠江入海碳通量的和约为 61.58 TgC·yr⁻¹。这两者虽有差异, 但主要是因为前者计算的是全国河流的入海碳通量特征, 而后者仅涵盖长江、黄河和珠江三大河流, 因而中国河流每年入海碳通量可以以 70.39 TgC·yr⁻¹来粗略估计。

本文估算的河流入海颗粒态碳通量(FPC)为 29.57 TgC·yr⁻¹(表 2), 因而 FPC 占入海碳通量(FC)的 42%, 其中颗粒态无机碳通量(FPIC)占入海碳通量的 26.87%。由此可见, 颗粒态碳通量在中国河流入海碳通量中占有较大比重, 今后应加强对悬移质输碳量的研究。

3.3 河流入海颗粒态碳通量占土壤水蚀碳量比重

河流输移的碳多来自土壤侵蚀, 河流碳通量的大小反映了流域内的土壤侵蚀状况。研究、监测河流碳通量的变化对水土保持工作具有指导意义^[2]。估算河流入海颗粒态碳通量在土壤水蚀碳量中所占的比重, 有助于充分认识土壤侵蚀对区域碳收支的影响。

Gao 等^[16]的分析表明, 水蚀引起的中国土壤碳迁移为 74.61 TgC·yr⁻¹, 其中有机碳为 51.49 TgC·yr⁻¹, 无机碳为 23.12 TgC·yr⁻¹。结合本文结果, 可以发现, 河流入海颗粒态碳通量(FPC)占土壤水蚀碳量的 39.63%, 表明土壤水蚀引起的碳迁移中, 近 40%以颗粒态碳通量的形式进入到海洋中。颗粒态有机碳通量(FPOC)占水蚀有机碳量的 20.68%, 这是因为, 水蚀的有机碳在河床中发生分解形成溶解态有机碳, 进而导致 FPOC 占土壤水蚀有机碳的比例较低。由于河流中颗粒态有机碳包括河流自生 POC, 因而由土壤侵蚀产生的有机碳直接进入海洋中的比例还要低于 20.68%。颗粒态无机碳通量(FPIC)占水蚀无机碳量的 81.82%, 表明水蚀无机碳是颗粒态无机碳通量的主要来源, 但由于河流中同样存在自生 PIC, 因此实际数值应小于 81.82%。能否依据土壤水蚀无机碳量估算入海 FPIC 将是下一步研究的方向。

3.4 河流入海颗粒态碳通量的年际变化特征

长江和黄河的颗粒态碳通量构成了中国河流入海 FPC 的主体, 2 条河流的 FPC 占到全国的 89.35%。因而本文就全国、长江和黄河入海颗粒态碳通量的年际变化特征进行分析, 由于多数站点数

据仅从2003年开始,所以本文分析了2003-2009年河流颗粒态碳通量的变化特征(图1)。

从图1可以看出,由于20世纪中后期的输沙量明显高于2003年后的输沙量,1965-2005年的全国河流入海颗粒态碳通量明显高于2003年后的数值。2003-2009年,全国河流入海颗粒态碳通量(FPC)逐年递减,到2009年,FPC仅为 $6.59 \text{ TgC}\cdot\text{yr}^{-1}$,占1965-2000年平均碳通量的22.3%。颗粒态无机碳通量(FPIC)表现出明显的减小特征,但有机碳通量没有明显的变化趋势,因而,2003-2007年,FPIC/FPOC >1 ,但2008年以后,FPIC/FPOC <1 ,这表明,在本世纪初,河流入海颗粒态碳通量仍以无机碳为主,直到2008年以后,FPC开始以有机碳为主。

对比两大河流入海颗粒态碳通量的变化趋势可以看出,在2004年以前,黄河的FPC明显高于长江的通量值,但此后长江的碳通量没有表现出明显的变化特征,相反黄河的碳通量却明显降低,因而表现出长江的入海颗粒态碳通量高于黄河的输碳量。黄河流域的这种变化一方面受制于黄河径流量的明显减少,另一方面也受黄河水体含沙量降低的影响,进而表明了中国水土流失的治理成效,使得通过泥沙输送到海洋中的碳量逐渐减少。

4 结论

本文基于《中国河流泥沙公报》数据,就中国河流入海颗粒态碳通量及其组成的特征和变化趋势进行了分析,结果表明:

(1) 1965-2005年,中国河流入海颗粒态碳通量平均为 $29.57 \text{ TgC}\cdot\text{yr}^{-1}$,其中有机碳占36.02%,无机

碳占63.98%,长江、黄河和珠江的碳通量约占全国的96.25%。

(2) 1965-2005年,中国河流入海颗粒态碳通量占河流入海碳通量的42%,占土壤水蚀碳量的39.63%,其中颗粒态无机碳通量占土壤水蚀无机碳的81.82%,但由于土壤水蚀不是河流颗粒态碳通量的唯一来源,上述比例可能会有所高估。

(3) 自2003年以来,河流入海颗粒态碳通量呈逐年递减的态势,但颗粒态有机碳通量所占比例有所增加。2009年,全国河流入海颗粒态碳通量仅为 6.59 TgC ,约为1965-2005年平均碳通量的22.3%。

(4) 本研究表明,颗粒态碳通量在河流入海碳通量中占有不容忽视的地位,今后应加强对该方面的研究工作。同时,颗粒态碳通量仅是河流碳通量的重要组成部分,今后还应在研究颗粒态碳通量的同时,全面分析中国河流入海溶解态碳通量的特征,以更详细地了解河流入海碳通量的动态变化规律,为定量评价中国区域的碳收支特征提供依据。

参考文献

- [1] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 23-41.
- [2] 高全洲, 沈承德. 河流碳通量与陆地侵蚀研究. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 369-375.
- [3] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: The Yangtze and Yellow Rivers (China). *Marine Chemistry*, 1993, 43(1-4): 235-246.
- [4] Ni H G, Lu F H, Luo X L, et al. Riverine inputs of total organic carbon and suspended particulate matter from the Pearl River Delta to the coastal ocean off South China.

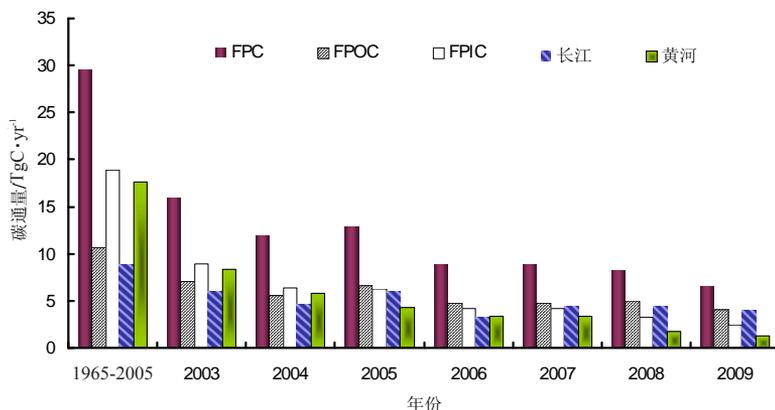


图1 中国河流入海颗粒态碳通量的动态变化特征

Fig.1 Dynamics of particulate carbon fluxes from rivers to the ocean in China

注:1965-2005指这些年份的平均值。

- Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(6): 1150-1157.
- [5] 刘新成, 沈焕庭, 黄清辉. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 332-340.
- [6] Guo X, Cai W J, Zhai W, et al. Seasonal variations in the inorganic carbon system in the Pearl River (Zhujiang) estuary. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1424-1434.
- [7] 姚冠荣, 高全洲, 王振刚, 等. 西江下游溶解无机碳含量的时空变异特征及其输出通量. 地球化学, 2008, 37(3): 258-264.
- [8] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2004. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2006. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2008. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [11] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2009. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [12] 张龙军, 姜波, 张向上, 等. 基于泥沙中碳含量的变化表征黄河调水调沙入海泥沙的扩散范围. 水科学进展, 2008, 19(2): 153-159.
- [13] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.
- [14] 徐嵩龄, 方精云, 刘国华. 黄河水系对流域碳分布的影响. 生态学报, 1995, 15(3): 287-295.
- [15] 魏秀国, 沈承德, 李定强, 等. 珠江流域土壤中碳库的存量与通量. 生态环境, 2004, 13(4): 670-673.
- [16] Gao Y N, Fang H J, Yu G R, et al. Spatial distribution and temporal dynamics of soil carbon removal caused by water erosion in China. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(3): 210-216.

Fluxes of Particulate Carbon from Rivers to the Ocean and Their Changing Tendency in China

ZHU Xianjin^{1,2}, YU Guirui¹, GAO Yanni^{1,2}, WANG Qiufeng¹

(1. Synthesis Research Center of CERN, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The river is the linkage of terrestrial and ocean carbon pools, the flux of which is a critical component of global carbon cycle. In this paper, The authors analyze the characteristics of the fluxes of particulate carbon from rivers to the ocean (FPC) in China and predicted their tendency based on the data obtained from *Bulletin of Chinese River Sediment*. The results indicate that, from 1965 to 2005, the annual mean FPC is 29.57TgC yr⁻¹, 36.02% of which is organic carbon, and the rest is inorganic carbon. FPC accounts for 42% of the river carbon fluxes. The quantity of particulate carbon flux from the Yangtze River, the Yellow River and the Pearl River accounts for 96.25% of the total amount in China. There is a decreasing tendency of FPC since 2003, while the ratio of organic part to the total shows an increasing tendency. The FPC of 2009 is only 6.59TgC·yr⁻¹, which is only 22.3% of the annual mean FPC from 1965 to 2005. Therefore, it is necessary to lay emphasis on the fluxes of particulate carbon in terms of its significant role in river carbon fluxes and terrestrial carbon budget.

Key words: particulate organic carbon; particulate inorganic carbon; flux; carbon cycle; soil erosion; China

本文引用格式:

朱先进, 于贵瑞, 高艳妮, 等. 中国河流入海颗粒态碳通量及其变化特征. 地理科学进展, 2012, 31(1): 118-122.