

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.04.011

井工矿开采对窟野河水资源的影响

李舒^{1,2}, 陈元芳¹, 李致家¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 为了定量研究流域内井工矿开采对水资源的影响, 采用 Mann-Kendall-Pettitt 方法检测窟野河 1966—2009 年年径流的突变点, 利用水文模型 (SWAT 和 SWAT-VISUAL MODFLOW) 定量计算井工矿开采对窟野河流域 1997—2009 年径流及 2009 年地下水的的影响。结果表明, 井工矿开采是该时期径流锐减及地下水疏干的主要原因, 其对年径流减少的贡献量为 24.20 mm, 占总减水量的 64.16%, 对地下水的影响量为 $4.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

关键词: 井工矿开采; 径流; 地下水; Mann-Kendall-Pettitt 方法; SWAT 模型; SWAT-VISUAL MODFLOW 耦合模型; 窟野河流域

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)04-0347-06

Impacts of underground mining on water resources of Kuye River

LI Shu^{1,2}, CHEN Yuanfang¹, LI Zhijia¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to quantitatively study the impacts of underground mining on the water resources of the Kuye River Basin, the Mann-Kendall-Pettitt method was used to detect the abrupt change point of the annual runoff over the period from 1966 to 2009. The impacts of underground mining on runoff of the Kuye River Basin over the period from 1997 to 2009 and groundwater in the year 2009 were quantitatively estimated using the SWAT and SWAT-VISUAL MODFLOW models. The results show that the sharp decrease in runoff and the depletion of groundwater during the study period are mainly attributed to underground mining, which is responsible for 24.20 mm of annual runoff reduction, accounting for 64.16% of the total reduction, and $4.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ of the groundwater affected.

Key words: underground mining; runoff; groundwater; Mann-Kendall-Pettitt method; SWAT model; SWAT-VISUAL MODFLOW coupling model; Kuye River Basin

窟野河流域内蕴藏着丰富的优质煤炭资源。1998 年原煤产量约为 $0.2174 \times 10^8 \text{ t}$, 2009 年激增到 $2.03 \times 10^8 \text{ t}$ 。井工矿开采引发河川基流减少, 地下水位下降^[1,2]。随着遥感和地理信息技术的发展, 利用水文模型可以量化研究大多数人类活动对径流及地下水的影响^[1,3]。但国内外利用水文模型定量评估窟野河流域内井工矿开采对径流及地下水的影响研究很少, 本文针对这个问题研究了 1979—2009 年井工矿开采对窟野河径流及地下水的影响。

1 研究区域与数据

窟野河全长 242 km, 流域面积约 8706 km^2 , 位于东经 $109^\circ 28' \sim 110^\circ 45'$ 、北纬 $38^\circ 22' \sim 39^\circ 50'$ 。本研究使用的数据有: 2000 年分辨率 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的 ASTER GDEM, 1966—2009 年的日序列水文数据 (图 1), $1:100\,000$

收稿日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(41130639, 51179045); 水利部公益性行业科研专项(201501022, 201301068)

作者简介: 李舒(1986—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lididshu30@163.com

的1996年、2000年土地利用数据集,1:1 000 000土壤类型数据集,全国地质资料馆地质资料。

2 方 法

2.1 Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法与 Pettitt 变异点检验法相结合

Rouge 等^[4]将 Mann-Kendall 趋势检验法^[5-6]与 Pettitt 变异点检测方法^[7]相结合,提出一种能够检测水文序列渐变点与突变点的方法(以下简称 MK-P 方法),并检测了美国 1217 个水文气象站 1910—2009 年年平均降雨和温度的渐变点和突变点。

2.2 人类活动对径流直接影响和间接影响的分离方法

人类活动对径流产生的直接影响(井工矿开采)和间接影响是共存的,为了便于分离,假设它们是相互独立的。参照水文模型模拟分离法,推导出人类活动对径流的直接影响分离公式:

$$\begin{cases} \Delta W_T = W_{C+HD+HID} - W_{C+HID} \\ \Delta W_{C+HID} = W_{CN+HIDN} - W_{C+HID} \\ \Delta W_{HD} = W_{C+HD+HID} - W_{CN+HIDN} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔW_T ——径流变化总量; ΔW_{C+HID} ——气候变化和人类活动(间接影响)影响量之和; ΔW_{HD} ——人类活动直接影响量; $W_{C+HD+HID}$ ——气候变化和人类活动影响时期的观测径流量; W_{C+HID} ——气候变化和人类活动(间接影响)影响时期的观测径流量; $W_{CN+HIDN}$ ——气候变化和人类活动影响时期的径流量还原为气候变化和人类活动(间接影响)影响时期的径流量。

2.3 水文模型

2.3.1 SWAT 模型参数率定及验证方法

模型参数率定采用 SUFI-2 算法^[8],并用 P 和 R 进行不确定性分析(P 、 R 为判断因子)。当 $P \geq 70\%$,同时 $R < 1$ 时,模拟结果不确定性较小^[9]。Nash-Suttcliffe Efficiency 系数(N_{SE})、确定性系数 R^2 和相对误差 R_E 这三个指标可以衡量模拟效果,若 $N_{SE} > 0.5$, $R^2 > 0.5$, R_E 在 $\pm 25\%$ 范围内,则模型模拟效果较好^[10]。

2.3.2 SWAT-VISUAL MODFLOW 耦合模型参数率定及验证方法

根据 SWAT 模型中的 HRU 和 VISUAL MODFLOW 中的有限差分网格特点构建 HRU-cell 的交互界面^[11]。利用 PEST 算法^[12]率定参数,用 R_{MSE} 和 N_{RMSE} 指标检验 SWAT-VISUAL MODFLOW 耦合模型(以下简称 S-VM 模型)的模拟效果。 $N_{RMSE} < 10\%$ 表示模拟效果相当好, $20\% \geq N_{RMSE} \geq 10\%$ 表示模拟效果较好, $30\% \geq N_{RMSE} \geq 20\%$ 表示模拟效果一般, $N_{RMSE} > 30\%$ 表示模拟效果差^[13]。

2.4 VM 模型的设置

模型含水层划分及边界条件见图2、图3。窟野河的温家川控制水文站监测的日水位作为定水头边界值。应力期、时间步长、时间单位分别是月、月、日。初

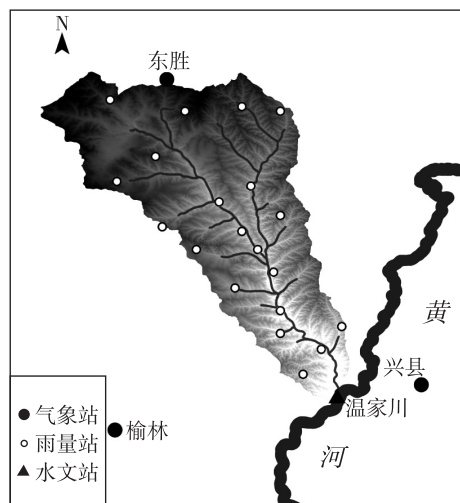


图1 窟野河水文站、雨量站及气象站分布

Fig. 1 Distributions of hydrological, rainfall, and meteorological stations in Kuye River Basin

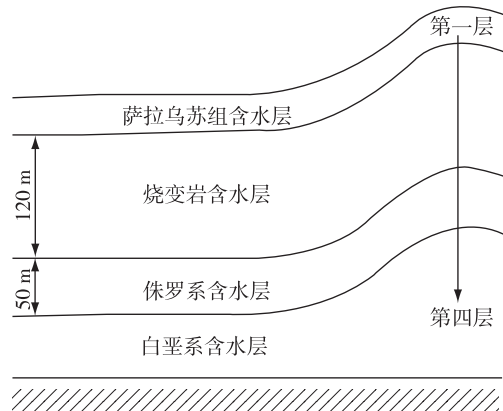


图2 窟野河地下水含水层划分示意图

Fig. 2 Sketch of groundwater aquifer division in Kuye River Basin

始导水率采用1 km×1 km 网格大小的 Kriging 插值法^[14]计算,水头统一假设为 30 m。其中,萨拉乌苏组含水层、烧变岩含水层、侏罗系含水层和白垩系含水层的初始底部深度分别为 30 m、150 m、200 m 和750~1 580 m。

2.5 井工矿情景设置

本次研究引入“三带”理论^[15]作为井工矿开采情景设置准则。根据钻孔位置(图 3)假设了 3 条裂缝(长 5 km、宽 1 km)。针对窟野河煤层上覆岩层特性选取式(2)(3)计算井工矿开采下的定水头边界:

$$H_1 = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} + 2.2$$

(2)

$$H_\eta = 20\sqrt{\sum M} + 10$$

(3)

式中: H_1 ——冒落带高度; H_η ——导水裂隙带高度; M ——煤层采厚或厚度。

由表 1 和实地考察可以判断采空区造成的裂隙到地表,由此裂缝的定水头设定为煤矿埋深高度。

根据 MK-P 突变点分析,以及 1979 年后大规模实施水土保持措施,1996 年后煤矿大规模开采,将 1979—2009 年分为 2 个时期:第一时期(1979—1996),第二时期(1997—2009)。研究过程见图 4。



图 3 窟野河地下水边界
Fig. 3 Groundwater boundary in Kuye River Basin

表 1 煤矿开采区冒裂带计算结果
Table 1 Calculation results for caving zones in coal fields

孔号	见煤深度	冒落带厚度	裂隙带厚度	冒裂带厚度
832	59.69	17.73	99.98	117.71
S4	32.16	14.54	69.06	83.60
S31	63.20	11.55	53.82	65.37

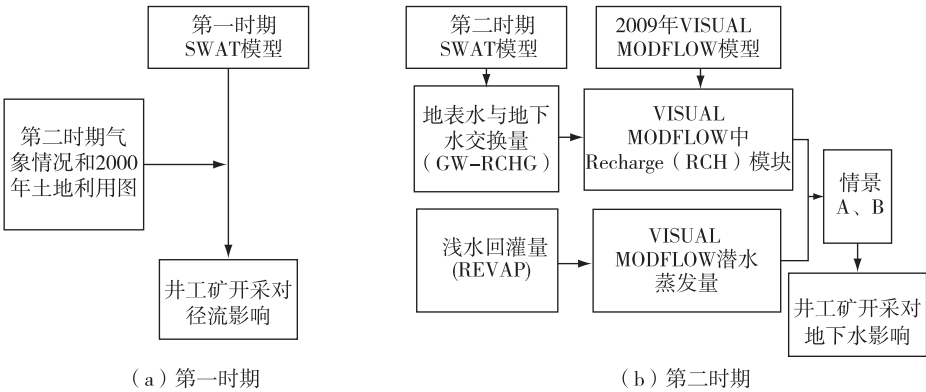


图 4 研究过程示意图
Fig. 4 Sketch of methodological steps

3 结 果

3.1 井工矿开采对径流影响

按照第 2 节介绍的方法计算井工矿开采对窟野河径流的影响,模拟结果见图 5。第一时期率定期和验证期模型模拟效果判定值计算结果如下: N_{SE} 和 R^2 分别达到了 0.76、0.60 以及 0.76、0.61, R_E 分别为 6.1%、8.0%。 P 和 R 分别达到了 0.73、0.61 以及 0.7、0.46。图 6 显示了第一时期和第二时期的年径流观测值和模拟值。井工矿开采对径流减少的贡献量为 24.20 mm,占总减水量的 64.16%。

3.2 井工矿开采对地下水的影响

窟野河 2009 年 S-VM 地下水模型模拟结果见图 7。A 情景(井工矿开采情景)下模型率定期和验证期的

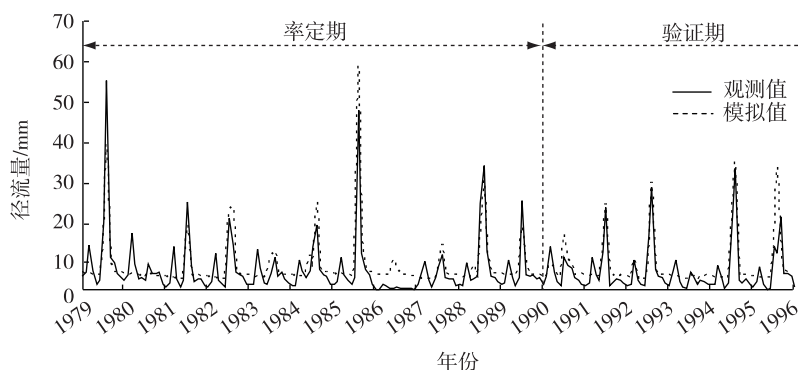


图5 窟野河 1979—1996 年月径流观测值与模拟值

Fig. 5 Observed and simulated values of monthly runoff in Kuye River from 1979 to 1996

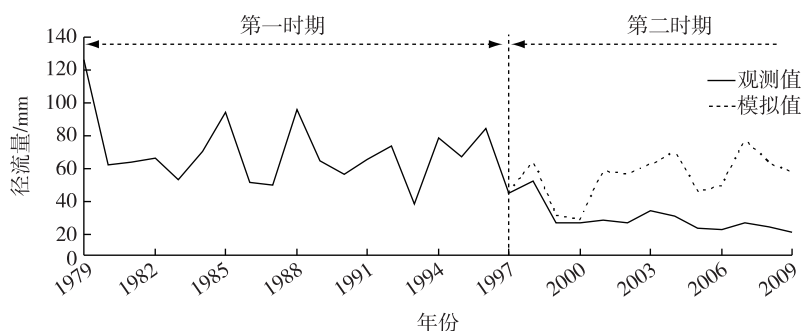


图6 窟野河 1979—2009 年年径流观测值与模拟值

Fig. 6 Observed and simulated values of annual runoff in Kuye River from 1979 to 2009

R_{MSE} 和 N_{RMSE} 分别为 0.27、0.1 及 0.02%、0.009%。验证期 R_{MSE} 和 N_{RMSE} 值均小于率定期,说明该耦合模型适用于模拟流域井工矿开采条件下地下水的变化情况。图 8 显示了 2009 年 12 月 A 情景、B 情景下第一含水层水头情况(B 情景即无井工矿开采情景),白色部分表示该区域的地下水已疏干。A 情景的含水层疏干面积积约是 B 情景的 4 倍,由此可以推断出井工矿开采加剧了地下水的疏干。

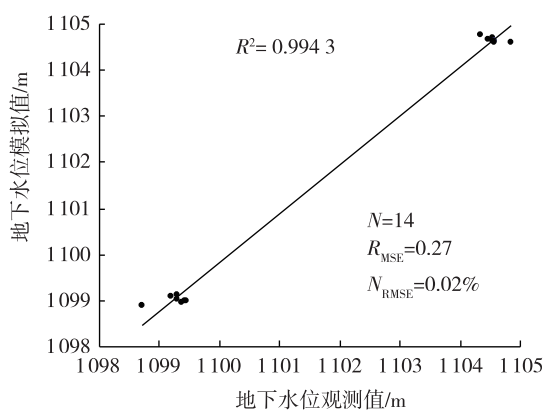


图7 2009 年 3—10 月地下水位模拟值与实测值拟合结果

Fig. 7 Fitting of observed and simulated groundwater levels in March to October 2009

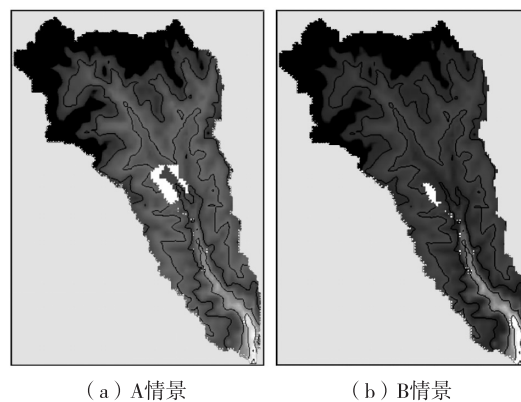


图8 2009 年 12 月地下水水位示意图

Fig. 8 Sketch of groundwater level in December 2009

通过水均衡(表 2)及面积加权法计算出 2009 年井工矿开采对地下水的总影响量为 $4.09 \times 10^8 \text{ m}^3$,与吴喜军^[1]利用统计学方法得出的结果一致。B 情景下,含水层在一定范围内出现了疏干情况,说明本次研究设置的 S-VM 模型参数也反映了人工打井取水对地下水的影响。以上结果表明本次研究假设的 A、B 情景具有一定的合理性。

表 2 研究区地下水均衡结果
Table 2 Groundwater balance in study area

情景	时间	地下水补充量				地下水排出量			
		储存量	定水头水量	河川渗漏量	$Q_{\text{地表-地下}}/Q_{\text{地下-地表}}$	储存量	定水头水量	河川渗漏量	蒸发量
A	2009-11	7 603 552	18. 001 5	21 291 964. 00	2 944 939	7 647 771	563 191. 3	22 573 168	1 020 140. 0
	2009-12	7 336 535	5. 425 3	21 299 278. 00	2 759 811	7 566 521	559 415. 5	22 557 484	720 368. 8
B	2009-11	12 011 382	131. 571 6	31 019. 93	2 978 101	12 150 065	0. 086 127	1 734 172	1 148 620. 0
	2009-12	11 763 116	125. 944 3	46 541. 27	2 790 861	12 062 157	0. 087 518	1 698 014	800 737. 4

注: $Q_{\text{地表-地下}}$ 为地表水转化为地下水水量, $Q_{\text{地下-地表}}$ 为地下水转化为地表水量。

4 讨 论

4.1 MK-P 方法在窟野河流域应用要点

本次研究使用了 MK-P 方法检测计算了窟野河年径流的突变点。在使用该方法时,首先需要确定一个阈值,该阈值是区分平稳变化点和突变点的临界值。根据 Rouge 等^[4]将该方法应用于美国水文站的结果,确定了阈值为 0. 4,计算得到的窟野河年径流突变点与吕新等^[2]的研究成果一致,并且该流域在 1979 年和 1996 年后分别进行了大规模的水保措施和煤矿开采活动,说明该阈值的取值是合理的。在不同的流域使用该方法时应注意阈值的取值范围会在 0. 1~0. 5 之间变化,需要根据流域径流的实际情况选取。

4.2 不确定性

本次研究结果的不确定性主要有以下几个原因:(a)SWAT 模型中使用的数据集尺度为日,但窟野河流域 0. 5 h 内的强降雨出现次数较多;(b)SWAT 模型参数的不确定性;(c)没有考虑流域内水工建筑物及不同的农业耕种方式给径流带来的影响;(d)在 VM 模型建立中,用 Kriging 插值法计算导水率时采用较低的分辨率;(e)人为假设的模型边界与实际情况有所不同。本次研究采用 P 、 R 和 N_{RMSE} 定量分析这些不确定性对计算结果的影响,其结果表明 SWAT 模型和 S-VM 模型模拟结果的不确定性都在可接受范围内,因此本研究计算出的井工矿开采对窟野河径流及地下水的影响量是合理的。

4.3 结果的分析及展望

研究中通过一系列概化方法计算了井工矿对径流及地下水水量的影响,利用 SWAT 模型计算了井工矿对径流的影响,其结果较好。在设置井工矿开采情景时,根据实地调研情况,概化了 3 条地裂缝,取得较好的模拟结果。

井工矿开采会使当地水文地质情况发生很复杂的变化,如煤层开采后形成采空区。这些采空区在一定条件下(如强降雨等),使地表出现塌陷区,甚至出现“天坑”,进而对含水层产生扰动影响,以至于改变含水层的储水率、导水率等地质参数,最终对径流及地下水产生影响。此外,窟野河流域分布着很多矿区,不同的开采方法也会对水文地质情况产生不同的影响。

5 结 语

本次研究首先利用 MK-P 突变点检测方法检测了窟野河流域年径流量的突变点(1979 年和 1996 年)。采用 SWAT 模型和 S-VM 模型分别定量计算了第二时期井工矿开采对窟野河径流的影响量以及 2009 年井工矿开采对窟野河地下水的影响量。计算结果表明,井工矿开采对年径流减少的贡献量为 24. 20 mm,占总减水量的 64. 16%,其对地下水的影响量为 $4. 09\times 10^8\text{ m}^3$ 。井工矿开采是窟野河径流减少及松散岩类孔隙水含水层疏干的主要原因。量化流域井工矿开采对径流及地下水的影响是一项复杂的研究,准确理解井工矿开采影响流域水循环机理是利用耦合模型模拟井工矿开采对径流及地下水影响这一物理过程的基础。

参考文献:

[1] 吴喜军. 煤炭开采地区河道径流变化与生态基流研究:以陕北窟野河流域为例[D].陕西:西安理工大学, 2013.
[2] 吕新, 王双明, 杨泽元,等. 神府东胜矿区煤炭开采对水资源的影响机制:以窟野河流域为例[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(2): 54-57. (LYU Xin, WANG Shuangming, YANG Zeyuan, et al. Influence of coal mining on water resources; a case study in Kuye River basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(2): 54-57. (in Chinese))

- [3] DONG W, CUI B S, LIU Z H, et al. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in an arid basin in northwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(18): 4854-4864.
- [4] ROUGÉ C, GE Y, CAI X M. Detecting gradual and abrupt changes in hydrological records[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 53(1): 33-44.
- [5] MANN H. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [6] KENDALL M, GIBBONS J D. Rank correlation methods[M]. Griffin: Oxford University Press, 1975.
- [7] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(2): 126-135.
- [8] ABBASPOUR K C, JOHNSON A C, van GENUCHTEN M T H. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3: 1340-1352.
- [9] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2/3/4): 413-430.
- [10] MORIASI D N, ARNOLD J G, van LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 50(3): 885-900.
- [11] 张雪刚,毛媛媛,董家瑞,等. SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用[J]. *水资源保护*, 2010, 26(3): 49-52. (ZHANG Xuegang, MAO Yuanyuan, DONG Jiarui, et al. A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(3): 49-52. (in Chinese))
- [12] ADAM S, TRACY N, PETER M. Natural recharge estimation and uncertainty analysis of an adjudicated groundwater basin using a regional-scale flow and subsidence model (Antelope Valley, California, USA) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(6): 1267-1291.
- [13] MICHELE R, NICOLA L, ZINA F. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 78(1): 17-30.
- [14] NOEL C. Spatial prediction and ordinary kriging[J]. *Mathematical Geology*, 1998, 20(4): 405-421.
- [15] 煤炭科学研究院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1981.

· 简讯 ·

河海大学 2 名教授入选 2015 年科技部创新人才推进计划

2016 年 5 月 19 日,科技部公布了 2015 年创新人才推进计划入选对象名单,河海大学王沛芳教授、杨涛教授入选 2015 年创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”。

科技部创新人才推进计划旨在通过创新体制机制、优化政策环境、强化保障措施,培养和造就一批具有世界水平的科学家、高水平的科技领军人才和工程师、优秀创新团队和创业人才,打造一批创新人才培养示范基地,加强高层次创新型科技人才队伍建设,引领和带动各类科技人才的发展,为提高自主创新能力、建设创新型国家提供有力的人才支撑。目前,河海大学已有 4 名教授入选科技部创新人才推进计划,另外 2 名分别是 2013 年科技部创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”入选对象苏怀智教授,2014 年科技部创新人才推进计划“中青年科技创新领军人才”入选对象王媛教授。

(本刊编辑部供稿)